

Entwicklung und Test einer stereoskopischen Multi-User Display-Strategie

Bachelorarbeit

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg
Fakultät 3 - Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen
Lehrstuhl Medientechnik

Denis Kurkov

Matrikelnummer: 3131946

Betreuer: Dr.-Ing. Dirk Höpfner

Abgabeort: Cottbus, 31.12.2015

Bachelorarbeit

Name: Kurkov, Denis**Matrikel:** 3131946**Ausgabe:** 01.07.2015

Entwicklung und Test einer stereoskopischen Multi-User Display-Strategie

Development and Test of a Strategy for a Stereoscopic Multi-User Display

Für die dreidimensionale Darstellung einer Ansicht wurden bisher entweder zeitlich, örtlich oder spektral abhängige Multiplexverfahren genutzt. Der oder die Betrachter nutzen für eine Ansicht des 3D-Videos die Shutter-, Polarisationsfilter- oder Bandpassfilterbrillen vor der Projektion oder vor dem Display. Jedes Verfahren beinhaltet jedoch Nachteile für die Wiedergabequalität des wahrgenommenen Bildes.

Ziel der Arbeit ist es ein kombiniertes Multiplexing zu entwickeln, das die Betrachtung von zwei verschiedenen 3D Ansichten auf einem Display oder Projektion erlaubt. Dafür sind die möglichen Multiplexverfahren (zeitlich, örtlich, spektral) einzeln und in Kombination zu erörtern und die jeweiligen Vor- und Nachteile der Verfahren und ihrer Umsetzung herauszuarbeiten. Eine mögliche Lösung für mindestens zwei unterschiedliche Betrachtungen ist umzusetzen. Die Realisierung soll objektiv und subjektiv in einem Test mit ca. fünf Probanden evaluiert werden.

Folgende Schwerpunkte sind in der Arbeit umzusetzen:

- Literatur- und Patentrecherche zu stereoskopischen Multiuserdarstellungen mit und ohne Filterbrillen,
- Erörterung der einzelnen Verfahren mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen,
- Entwicklung und Umsetzung eines stereoskopischen Multiuserverfahrens mit einem Multiplexverfahren oder mit Hilfe der Kombination von mehreren Multiplexverfahren,
- Theoretische Betrachtung der maximalen Anzahl verschiedener 3D Ansichten mit einem Display/Projektion unter Berücksichtigung der Grenzen bei der technischen Umsetzung und der visuellen Wahrnehmung mit einem Ausblick auf die Anforderungen für die Anzahlerhöhung der Ansichten.

Betreuer: Dr.-Ing. Dirk Höpfner

Prof. Dr.-Ing. C. Hentschel

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Erweiterung einer stereoskopischen Anzeige um eine Mehrnutzer-Komponente. Das Ziel besteht darin, mehreren Nutzern (mindestens zwei) das Betrachten eines separaten Stereobildes auf einem Bildschirm gleichzeitig zu ermöglichen. Es werden zwei Strategien getestet. Die entwickelten Systeme beinhalten mehrere Bildtrennungsverfahren, damit sowohl die Trennung der linken und der rechten Bildkomponente des Stereobildes als auch die Trennung der Nutzer untereinander realisiert werden können. Im ersten Verfahren werden Farb- und Polarisationsfilter kombiniert. Hier wird die zirkulare Polarisation für die Nutzertrennung genutzt. Die Farbfilter werden für die Links-Rechts-Trennung eingesetzt. Im zweiten System werden die Polfilter genutzt, um das stereoskopische Sehen zu ermöglichen. Die Nutzertrennung geschieht mit einer modifizierten Flüssigkristall-Shutterbrille. Zu Testzwecken werden erweiterte Stereobilder und Stereobild-Sequenzen gerendert und für die Darstellung auf einem Stereo-3D LCD-TV optimiert. Neben den Versuchen mit einigen Probanden, werden spektrale Messungen durchgeführt und ausgewertet. Abschließend wird ein Vergleich der getesteten Systeme vorgenommen. Dabei werden Schätzungen zur Skalierbarkeit und Verbesserungsvorschläge hinsichtlich der Bildqualität getätigt.

Abstract

This thesis examines the possibility of adding a multi-user component to a stereo display. The goal is to provide separate stereoscopic images for multiple (at least two) users simultaneously on a single screen. Therefor two strategies are implemented and tested. The developed systems consist of multiple image filtering techniques in order to provide separation for the left and the right component of a stereo image as well as user separation. The first system incorporates a combination of color and polarization filter. In this case, circular polarization is used to isolate the view of each user, while color filters separate eye-specific images of the stereoscopic picture. The second approach utilizes polarization filters for stereoscopic vision while user separation is achieved by the use of modified liquid crystal shutter glasses. For test purposes, advanced stereoscopic images and image sequences are generated and optimized for viewing on a Stereo-3D LCD TV. Alongside with small-scale tests with subjects, several spectral measurements are performed and evaluated. Eventually a comparison among the tested systems is provided, which includes suggestions regarding image quality improvements and scalability of the two examined techniques.

Begriffe und Abkürzungen

| | |
|---------------------|---|
| DLP | Digital Light Processing |
| Full HD | Full High Definition; Entspricht der Bildauflösung von 1920 x 1080 Pixel |
| ColorCode-3D | Ein Anaglyphen-Bildtrennungsverfahren; Blaues Filter auf der linken Seite, gelbes Bild auf der rechten Seite |
| Ghosting | Geister- bzw. Doppelbilder, die bei fehlerhafter Trennung vom linken und rechten Bild bei einer S3D-Darstellung auftreten |
| HDMI | High Definition Multimedia Interface (Bild- und Tonübertragungsstandard) |
| I/O-Pin | Input / Output Pin |
| LC(D) | Liquid Crystal (Display); Flüssigkristall(-bildschirm) |
| RealD-Brille | Brille auf der Basis von Polarisationsfiltern zur Betrachtung stereoskopischer Inhalte, entwickelt von dem Unternehmen RealD Inc. |
| S3D | Stereo-3D; Illusion von Räumlichkeit mithilfe der Stereoskopie bzw. stereoskopischen Bildpaaren |
| VGA | Video Graphics Array (Bildübertragungsstandard) |
| VR | Virtuelle Realität |
| VSync | Vertikale Synchronisation |
| <i>T</i> | Zeitintervall |
| <i>t</i> | Zeitpunkt |
| <i>s</i> | Sekunden |
| <i>ms</i> | Millisekunden |
| λ | Wellenlänge |
| nm | Nanometer |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Stereopaar und 3D-Effekt..... | 2 |
| Abbildung 2: Subtraktive Farbmischung | 3 |
| Abbildung 3: Wellenlängen-Filter..... | 4 |
| Abbildung 4: Zerlegung in Teilwellen | 4 |
| Abbildung 5: Polarisationsverfahren, durchlassende Konfiguration, rechtsdrehend..... | 5 |
| Abbildung 6: Realisierung des Polarisationsverfahrens bei einem LCD-TV | 6 |
| Abbildung 7: Multi-user-fähige Filterbrillen | 11 |
| Abbildung 8: Aufbau der VR-Umgebung | 12 |
| Abbildung 9: Gerenderte Szene | 12 |
| Abbildung 10: Position des Polfilters | 13 |
| Abbildung 11: Filterzusammenstellung | 14 |
| Abbildung 12: Anaglyphenbilder | 15 |
| Abbildung 13: Screenshot – Kanalmixer..... | 15 |
| Abbildung 14: Screenshot - 3D-Glasses Filter..... | 15 |
| Abbildung 15: Fertiges Testbild | 16 |
| Abbildung 16: Auswertung des Tests | 17 |
| Abbildung 17: Referenz – Schwarz | 18 |
| Abbildung 18: Referenz – Weiß..... | 18 |
| Abbildung 19: Referenz – RGB-Spektrum..... | 19 |
| Abbildung 20: Referenz – Leuchtdichte | 19 |
| Abbildung 21: Leuchtdichte – Filter..... | 20 |
| Abbildung 22: Rot-Cyan-Anaglyphen | 20 |
| Abbildung 23: Rot-Cyan-Anaglyphen | 21 |
| Abbildung 24: Aufbau der Shutterbrille..... | 23 |
| Abbildung 25: Verstärkerschaltung..... | 24 |
| Abbildung 26: Zustandsautomat..... | 24 |
| Abbildung 27: Auswirkungen der Expositionszeit | 25 |
| Abbildung 28: Bildaufbau vs. Expositionszeit..... | 25 |
| Abbildung 29: Messung der Reaktionszeit | 27 |
| Abbildung 30: VSync und Bildwechsel..... | 27 |
| Abbildung 31: VSync mit Farbsignal..... | 28 |
| Abbildung 32: Pin-Belegung für den Arduino..... | 29 |
| Abbildung 33: Versuchsaufbau | 29 |
| Abbildung 34: Zustandsautomat..... | 29 |
| Abbildung 35: Kompositionseinstellungen | 32 |
| Abbildung 36: 3D-Glasses Einstellungen | 32 |
| Abbildung 37: Deckkraftanimation | 32 |
| Abbildung 38: Aufbau - Shutter-Polfilter Test (Übersicht)..... | 33 |
| Abbildung 39: Aufbau - Shutter-Polfilter Test (Arduino) | 33 |
| Abbildung 40: Auswertung des Tests (alle Systeme)..... | 34 |
| Abbildung 41: Leuchtdichte – Filter..... | 35 |
| Abbildung 42: Shutter-Polfilter (geöffnet)..... | 35 |
| Abbildung 43: Shutter-Polfilter (im Betrieb)..... | 36 |
| Abbildung 44: Polfilterdrehung | 37 |

Inhalt

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 2 | Funktionsweise von Stereo-3D | 2 |
| 2.1 | Spektrale Multiplexverfahren | 3 |
| 2.1.1 | Anaglyphenfilter | 3 |
| 2.1.2 | Wellenlängen-Filter | 3 |
| 2.1.3 | Polarisationsfilter | 4 |
| 2.2 | Shutter-System..... | 6 |
| 2.3 | Autostereoskopische Verfahren | 7 |
| 3 | Herausforderungen für Multiuser-S3D | 8 |
| 3.1 | Herausforderungen beim optischen Multiplexverfahren | 8 |
| 3.2 | Herausforderungen bei zeitlichen Multiplexverfahren | 9 |
| 3.3 | Bestimmung der Nutzerposition..... | 10 |
| 4 | Kombination von Multiplexverfahren | 11 |
| 4.1 | Generierung von S3D-Inhalten | 12 |
| 4.2 | Anaglyphenfilter und Polarisationsfilter | 13 |
| 4.2.1 | Konfiguration der Filterbrille | 13 |
| 4.2.2 | Erstellung des Testbildes für den subjektiven Test | 14 |
| 4.2.3 | Subjektiver Test - Durchführung | 16 |
| 4.2.4 | Subjektiver Test – Auswertung..... | 17 |
| 4.2.5 | Objektiver Test | 17 |
| 4.3 | LC-Shutter und Polarisationsfilter | 21 |
| 4.3.1 | Konfiguration der Filterbrille..... | 21 |
| 4.3.2 | Modifikation der Shutterbrille..... | 22 |
| 4.3.3 | Konfigurationsparameter und Einschränkungen | 24 |
| 4.3.4 | Verzögerung bei der Visualisierung des Videosignals | 27 |
| 4.3.5 | Messung des Display Lags | 27 |
| 4.3.6 | Erstellung der Testsequenz für den subjektiven Test | 31 |
| 4.3.7 | Subjektiver Test - Durchführung | 32 |
| 4.3.8 | Subjektiver Test – Auswertung..... | 34 |
| 4.3.9 | Objektiver Test | 35 |
| 5 | Fazit und Ausblick..... | 38 |
| 6 | Verwendete Software | 39 |
| 7 | Quellenverzeichnis | 40 |

| | |
|---|----|
| 7.1 Literatur / Wissenschaftliche Publikationen | 40 |
| 7.2 Internet | 40 |
| 7.3 Bildmaterial | 42 |

1 Einleitung

Eines der Merkmale, das die visuelle Wahrnehmung bei Menschen auszeichnet, ist die Fähigkeit räumlich zu sehen, auch Stereopsis genannt. Diese Fähigkeit ermöglicht eine genauere Beurteilung der Position von Objekten hinsichtlich ihrer Entfernung zum Betrachter (Tiefenwahrnehmung).

Bereits seit einigen Jahren produziert die Unterhaltungsindustrie Inhalte, die sich dieses Phänomen zunutze machen. Neben Filmen und Videospielen in Stereo-3D (S3D) im Verbrauchersektor findet die Technologie auch unmittelbar im Entwurfsstadium mancher Produkte Anwendung. Insbesondere beim Projektieren von Maschinen aller Art oder architektonischen Herausforderungen wird heute immer häufiger auf die virtuelle Realität (VR) zurückgegriffen. Die Möglichkeit ein Produkt ansehen zu können, ohne reale Modelle oder gar das Produkt selbst herstellen zu müssen, hat in vielen Bereichen, wie Konstruktions- und Fehleranalyse sowie Design, große Vorteile.

Dank Technologien, die in moderner Stereoskopie zum Einsatz kommen, ist die Umsetzung dieser Kriterien auf recht hohem Niveau gewährleistet, sofern nur ein Nutzer mit dem VR-System gleichzeitig interagiert. Bei der Projektierung komplexer Produkte und Anlagen sind jedoch meistens mehrere Personen am Entwurf beteiligt. Es ist also erforderlich, dass mehrere Personen gleichzeitig die VR-Anlage in Anspruch nehmen können, wobei jeder Nutzer ggf. ein separates S3D-Bild wahrnehmen sollte.

Im Folgenden soll untersucht werden, wie eine multi-user-fähige stereoskopische Darstellung mit existierenden Bildtrennungsverfahren auf einem LC-Bildschirm erzeugt werden kann.

2 Funktionsweise von Stereo-3D

„Natürliches“ stereoskopisches Sehen wird dadurch ermöglicht, dass die über die Augen wahrgenommenen Bilder zueinander leicht versetzt sind. Das anschließende Verarbeiten und Zusammenführen dieser Bilder im Gehirn (Fusion) sorgt für die Entstehung eines dreidimensionalen Eindrucks. Die Tiefeninformation wird dabei aus dem Versatz einzelner Objekte im Bild entnommen.

Um diesen Effekt zu reproduzieren muss zunächst dafür gesorgt werden, dass sowohl für das linke als auch für das rechte Auge je ein Bild erzeugt wird. In der Filmindustrie wird dies gewährleistet indem bei den Aufnahmen spezielle Zwei-Kamera-Systeme verwendet werden, wobei die Kameras mit einem leichten horizontalen Versatz zueinander montiert sind. Mittlerweile sind aber auch Lösungen vorhanden, die innerhalb eines Kameragehäuses Platz finden. Im Bereich der virtuellen Realität (VR) wird das ähnlich gehandhabt mit dem Unterschied, dass die Kameras sowie ihre Umgebung vom Rechner simuliert werden.

Die nächste Herausforderung besteht in der Darstellung des Bildes auf einer Projektionsfläche bzw. einem Bildschirm. Zum einen müssen sowohl das rechte als auch das linke Bild auf *einem* Bildschirm zu sehen sein (ggf. unter Einsatz optischer Täuschungen). Zum anderen muss dafür gesorgt werden, dass das jeweilige Auge *nur* jenes Bild wahrnimmt, welches für dieses Auge bestimmt ist. Auch hier bestimmt die Parallaxe der beiden Teilbilder darüber, ob das Bild vor (negative Parallaxe, Abb. 1a), in (Null-Parallaxe, Abb. 1b) oder hinter (positive Parallaxe, Abb. 1c) der Bildschirmenebene wahrgenommen wird [Rea0x].

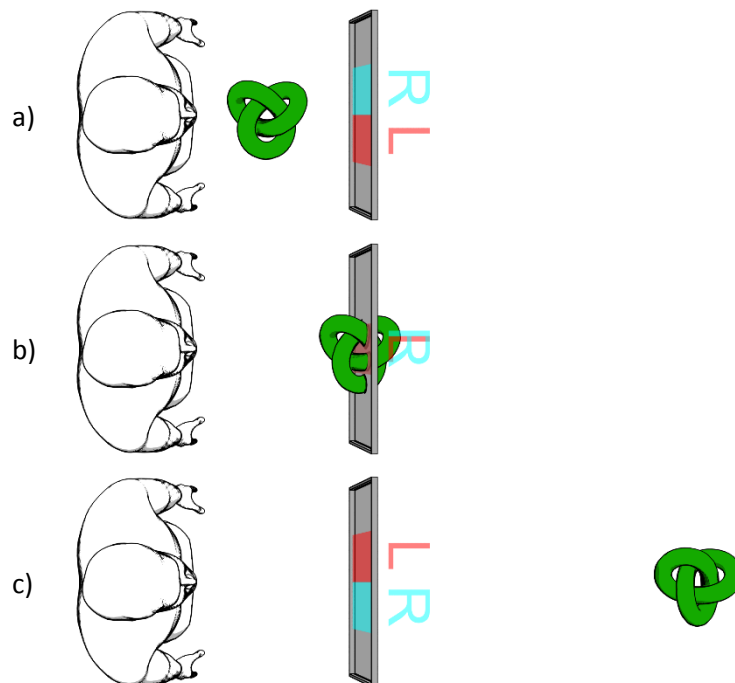


Abbildung 1: Stereopaar und S3D-Effekt (basierend auf Abbildungen aus [Rea0x])

Im Folgenden sollen einige ausgewählte Verfahren zur Realisierung dieser Anforderungen betrachtet werden.

2.1 Spektrale Multiplexverfahren

2.1.1 Anaglyphenfilter

Bei Anaglyphenfiltern werden das linke und das rechte Bild über eine Farbcodierung optisch voneinander separiert. Zur Betrachtung von Anaglyphen-Stereoinhalten ist eine Brille mit Farbfiltern nötig. Bei der Farbwahl für Codierung und Brillenfilter wird auf das Prinzip der subtraktiven Farbmischung zurückgegriffen. Das Ziel: Das rechte Farbfilter soll das rechte Bild durchlassen, das linke Bild blockieren und vice versa. Dies lässt sich erreichen, indem die Filter zueinander komplementär gefärbt sind.

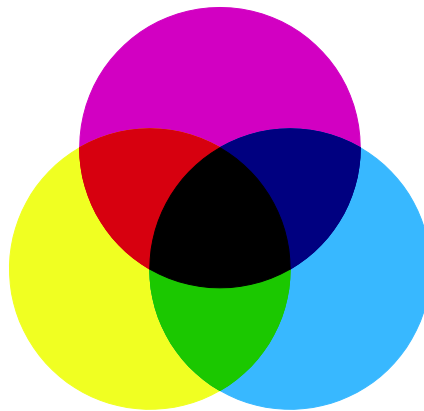


Abbildung 2: Subtraktive Farbmischung [subCol]

Wie in der Abbildung 2 verdeutlicht werden soll, sind hierbei mehrere Farbkombinationen denkbar, z.B., Rot-Cyan, Gelb-Blau und Magenta-Grün. Bei einer gängigen Variante von Anaglyphen-S3D wird das linke Bild rot und das rechte mit Cyan codiert. Die Brille hat dementsprechend links einen roten und rechts einen Cyan-gefärbten Filter [Ana].

Die Vorteile der Anaglyphendarstellung liegen in den niedrigen Kosten für die Brillenherstellung und der hohen Kompatibilität: Anaglyphen-S3D lässt sich sowohl auf jedem Farbbildschirm als auch auf (farbigen) Printmedien umsetzen.

Ein großer Nachteil besteht allerdings in einer, gegenüber anderen Verfahren, extrem hohen Farbverfälschung. Außerdem wird eine große Menge Licht von den Filtern absorbiert. Dadurch wird das Bild dunkler. Weiterhin ist eine wirklich saubere Trennung des rechten und linken Bildes nicht möglich, wodurch es zum Ghosting-Effekt kommt.

2.1.2 Wellenlängen-Filter

Die Grundfarben für Bildwiedergabegeräte, Rot, Grün und Blau (RGB) lassen sich im sichtbaren Lichtspektrum durch unterschiedliche Wellenlängen umsetzen. Ein Verfahren, das ursprünglich innerhalb eines Forschungsprojektes für die ehemalige DaimlerChrysler AG entwickelt wurde und heute als INFITEC™ bekannt ist, macht sich diese Eigenschaft des Lichtes zunutze. Hierbei werden auf der Nutzerseite ebenfalls Brillen eingesetzt. Diese Brillen lassen sowohl auf dem linken als auch auf dem rechten Auge R-, G- und B-Anteile passieren. Die Filter sind sowohl auf Projektor- als auch auf der Brillenseite so konstruiert, dass die RGB-Bestandteile im rechten Bild bzw. Filter sich von den RGB-

Bestandteilen im linken Bild, hinsichtlich der eingesetzten Wellenlängen, leicht unterscheiden. Dies führt zur gewünschten Trennung zwischen dem linken und dem rechten Bild.

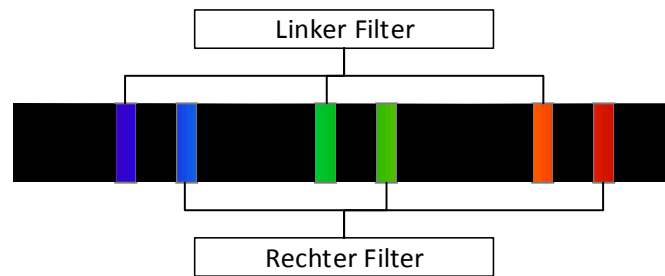


Abbildung 3: Wellenlängen-Filter

Zu den Vorteilen dieses Verfahrens gehört eine gute Farbwiedergabe. Das Verfahren konnte sich dadurch kommerziell als Dolby® 3D behaupten. Gegenüber dem Polarisationsverfahren ist keine Silberleinwand beim Einsatz eines Projektors nötig [Inf].

Die Nachteile liegen in hohen Kosten für die Hardware. Für die Wiedergabe ist ein spezieller Projektor nötig, der in Abhängigkeit davon, ob gerade das linke oder das rechte Bild gezeigt wird, den richtigen Filter in Position bringt. Alternativ lässt sich ein Zwei-Projektor System einrichten, wobei ein Projektor je Auge eingesetzt wird. Für LCD-Bildschirme ist das System zurzeit nicht verfügbar. Auch die Herstellung der Wellenlängen-Filter ist relativ kostspielig, was sich gerade bei der Brillenherstellung negativ auswirkt.

2.1.3 Polarisationsfilter

Hierbei wird eine Kombination aus linearen Polarisationsfiltern und $\lambda/4$ -Platten (auch als Verzögerungs- oder Wellenplatte bezeichnet) eingesetzt. Das von der Bildquelle ausgesendete Licht passiert zunächst einen linearen Polfilter, der in einem Winkel $\alpha = 45^\circ$ zur optischen Achse der Verzögerungsplatte liegt. Was nun folgt, lässt sich am besten beschreiben indem die Lichtwelle in zwei sich überlagernde und zueinander senkrechte Wellen zerlegt wird (siehe Abbildung 4).

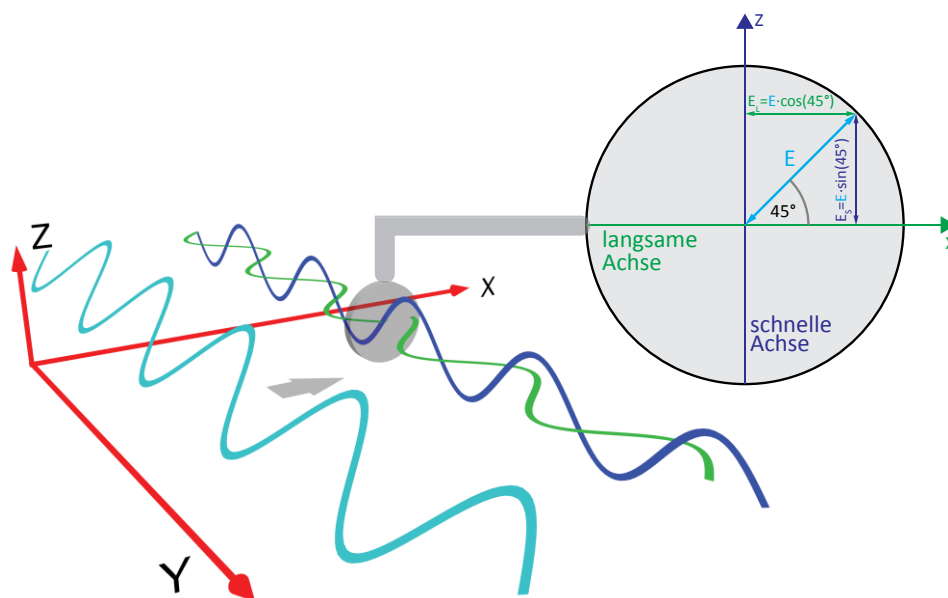


Abbildung 4: Zerlegung in Teilwellen

Die Teilwelle, die die Verzögerungsplatte parallel zu deren optischen Achse durchdringt, passiert die Platte ohne Veränderung. Die zweite Teilwelle, die die Wellenplatte senkrecht zur optischen Achse passiert, wird, im Fall einer $\lambda/4$ -Platte, so verzögert, dass zwischen den beiden Teilwellen eine Phasenverschiebung von 90° entsteht. Durch die Addition der Feldvektoren der beiden Teilwellen entsteht eine sich drehende Welle (siehe Abbildung 5). Die Drehrichtung ist davon abhängig, ob beim Ausrichten des linearen Polfilters ein Winkel von $+45^\circ$ oder -45° hinsichtlich der optischen Achse gewählt wurde. Das Licht ist jetzt zirkular polarisiert.

Auf der Seite des Betrachters, der eine entsprechende Filterbrille trägt, werden die Filter in umgekehrter Reihenfolge von der Lichtwelle durchschritten. Zunächst wird die Drehung der Welle durch eine weitere $\lambda/4$ -Platte aufgehoben. Dies geschieht durch eine weitere Verzögerung derselben Teilwelle um weitere 90° . Ist der Polfilter hinsichtlich der Verzögerungsplatte auf der Betrachterseite in einem Winkel $\alpha' = -\alpha$ ausgerichtet, kann die Lichtwelle passieren. Ist jedoch $\alpha' = \alpha$ wird die Lichtwelle blockiert. Das eben beschriebene Funktionsprinzip wird in der folgenden Grafik anschaulich dargestellt.

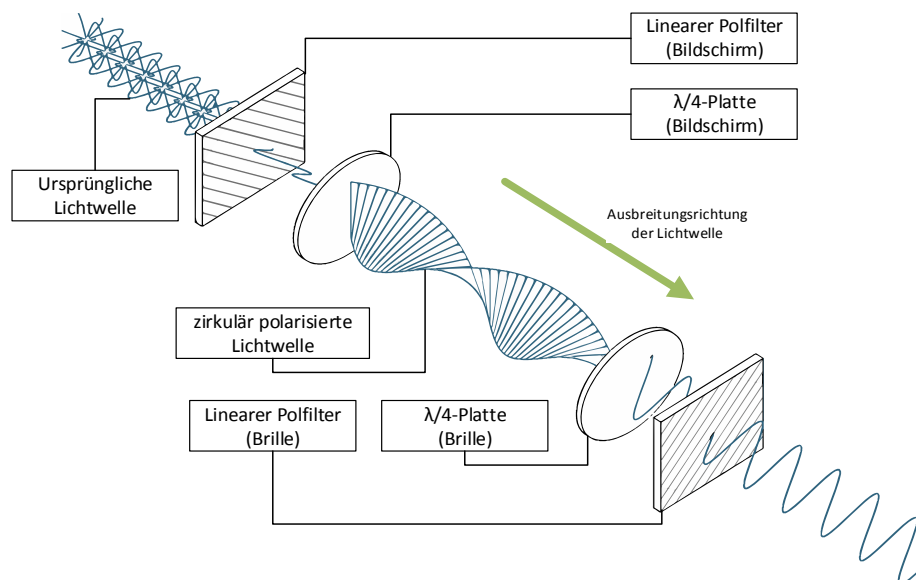


Abbildung 5: Polarisationsverfahren, durchlassende Konfiguration, rechtsdrehend

Mithilfe dieses Verfahrens lassen sich das rechte und das linke Bild voneinander trennen. Die Filterkonfiguration wird so gewählt, dass der linke Bildanteil gegen (linksdrehend) und der rechte Bildanteil mit (rechtsdrehend) den Uhrzeigersinn (Ausbreitungsvektor als Drehachse) gedreht wird.

Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass keine Manipulation an der Bildfarbe notwendig ist. Außerdem sind die Filter kostengünstig herstellbar.

Zu den Nachteilen zählen eine leichte Verfälschung hinsichtlich der Farbtemperatur und das Auftreten von Geisterbildern (Ghosting) bei hellen Bildinhalten und starken Kontrasten. Beim Einsatz von Beamern muss entweder auf ein Zwei-Beamer-System oder auf ein Gerät mit alternierender Zeilenpolarisation zurückgegriffen werden. Im zweiten Fall sind die Pixelzeilen alternierend links und rechts polarisiert. Bei Projektoren ist für die Aufrechterhaltung der zirkularen Polarisation eine reflektierende Leinwand zu verwenden.

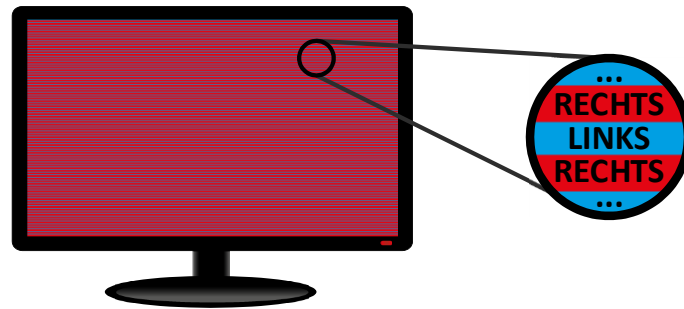


Abbildung 6: Realisierung des Polarisationsverfahrens bei einem LCD-TV

Diese Lösung kommt auch bei LC-Panels zum Einsatz. Dabei wird die begrenzte Auflösung des menschlichen Auges ausgenutzt. Bei entsprechend hoher Pixeldichte und einem ausreichend großen Abstand des Betrachters zum Bildschirm, können die Grenzen einzelner Pixel bzw. Pixelzeilen nicht mehr wahrgenommen werden. Diese Variante hat allerdings den Nachteil, dass die Bildauflösung halbiert wird. Bei einem Full HD-TV stehen damit jeweils 540 Pixelzeilen für jedes Auge bereit. Bedingt durch die Funktionsweise wird auch ein relativ großer Lichtanteil durch die Filter absorbiert [Vau10].

2.2 Shutter-System

Im Gegensatz zu „passiven“ spektralen und polarisierenden Filtern, zählt das Shutter-System zu den sogenannten aktiven S3D-Verfahren. Die Herangehensweise basiert auf dem Funktionsprinzip der Flüssigkristallbildschirme. Es wird nur auf der Nutzerseite eine „Shutterbrille“ benötigt. Ein „Shutter“ besteht aus zwei parallel zueinander ausgerichteten linearen Polarisationsfiltern und einem Flüssigkristallsubstrat, der sich zwischen den beiden Filterplatten befindet. Liegt auf dem Substrat keine elektrische Spannung an, befinden sich die Flüssigkristalle in einem ungeordneten Zustand, sodass das Licht ungestört passieren kann. Wenn eine Spannung angelegt wird, richten sich die Kristalle so aus, dass das Substrat die Funktion eines linearen Polfilters übernimmt, der zu den beiden anderen senkrecht ausgerichtet ist. In diesem Zustand kann kein Licht den Shutter passieren. Bei einer Shutterbrille werden der linke und der rechte Shutter abwechselnd geöffnet, je nachdem ob der Bildschirm das linke oder das rechte Bild zeigt.

Damit dieses Verfahren funktionieren kann, muss die Geschwindigkeit des Bildwechsels zwischen links und rechts oberhalb der menschlichen Wahrnehmungsschwelle liegen. Diese variiert abhängig von den Lichtbedingungen zwischen 60 Hz und 75 Hz. Damit liegt die Bildwiederholfrequenz, die nötig ist, um jeweils das linke und das rechte Bild *scheinbar* gleichzeitig darzustellen, bei mindestens 120 Hz oder höher. Dadurch entstehen erhöhte Anforderungen an die Hardware, insbesondere an die Videoschnittstellen, da diese nun mindestens die doppelte Datenrate übertragen müssen. Es sind auch spezielle Beamer bzw. LCDs nötig, die diese Bildwiederholrate unterstützen.

Der entscheidende praktische Unterschied und Vorteil gegenüber anderen, oben angeführten Verfahren besteht darin, dass dieses Multiplexverfahren auf zeitlicher Ebene abläuft. Das bedeutet, dass sich, im Falle eines LC-Bildschirms, die vollständige Auflösung ausnutzen lässt. Auch Zwei-Beamer Systeme werden unnötig.

Abgesehen von den hohen bildschirmseitigen Hardwareanforderungen besteht ein weiterer Nachteil in dem relativ komplexen Aufbau der Shutterbrille. Neben zwei LC-Shuttern werden eine interne Spannungsversorgung und ein Mikrocontroller zur Steuerung der Verschlüsse benötigt.

Eine Synchronisation zwischen dem Bildschirm und der Brille ist ebenfalls erforderlich [Woo11]. Bedingt durch die Konstruktion der Shutter kann es außerdem passieren, dass bei einer ungünstigen Neigung des Kopfes relativ zum LC-Bildschirm das Bild durch die linearen Polfilter vollständig blockiert wird [Vau10]. Bedingt durch das alternierende Schließen der LC-Verschlüsse und der konstruktionsbedingten Nutzung von linearen Polarisationsfiltern sinkt auch die Lichtausbeute: das Bild erscheint dunkler.

2.3 Autostereoskopische Verfahren

Als autostereoskopische Verfahren werden Methoden zur Darstellung von S3D bezeichnet, die ohne eine Filter- bzw. Shutterbrille oder ähnliche Geräte auf der Nutzerseite realisierbar sind.

Hierzu zählt, z. B., die Nutzung von Mikrolinsenrastern, deren Einsatz unter anderem aus den sogenannten „Wackelbildern“ bekannt ist. Das Display hinter dem Mikrolinsenraster muss ein vollständiges Lichtfeld eines ausgewählten Bereiches wiedergeben. Dazu sind Bildschirme mit extrem hoher Auflösung notwendig, wobei nur ein Bruchteil diese Auflösung vom Nutzer wahrgenommen wird. Beim Positionswechsel des Betrachters kann der o. g. „Wackeleffekt“ als unerwünschte Nebenwirkung auftreten und den S3D-Effekt für einen bestimmten Blickwinkel eliminieren (Übergang zwischen Lichtfeld-Clustern). Im Vergleich zu den bisher betrachteten Verfahren besteht der Vorteil dieser Technik in einer relativ geringen Lichtabsorption durch die Mikrolinsen. Die Anzahl möglicher Ansichten ist nur durch die Auflösung beschränkt, die für die Darstellung eines Lichtfeld-Clusters zur Verfügung steht. Allerdings ist es mit diesem Verfahren nicht möglich, für jeden Nutzer einen *grundsätzlich* anderen Bildinhalt darzustellen. Es sind lediglich *mehrere* Ansichten der *gleichen* Szenerie aus unterschiedlichen Blickwinkeln realisierbar. Insgesamt lässt sich dieses System als eine Umkehrung der Lichtfeldkamera beschreiben [Tos10], [Vid04], [Vid06].

Eine weitere Methode, die am Massachusetts Institute of Technology erforscht wurde, nennt sich „Layered 3D“ bzw. „Tensor Display“. Hierbei werden mehrere LC-Platten übereinandergestapelt, wobei die Bilddarstellung ähnlich der Umkehrung eines Tomographen funktioniert. Dieses System ist insbesondere auf die Darstellung von VR orientiert, da sich computergenerierte Inhalte relativ einfach „schichtweise“ berechnen lassen. Für Bildinhalte mit starken Farbkontrasten ist das System allerdings weniger geeignet, da in solchen Fällen vermehrt „Geisterbilder“ auftreten [MIT10], [MIT11].

Diese Lösungen bieten bereits die Möglichkeit für einen multi-user-fähigen S3D-Betrieb und sind daher in den Bereich der automultiskopischen Verfahren einzuordnen [MIT11].

3 Herausforderungen für Multiuser-S3D

Wie bereits in der Einleitung kurz angedeutet wurde, besteht das Ziel von Multiuser-S3D darin, mehreren Nutzern eine stereoskopische Ansicht auf einer Projektionsfläche bzw. Bildschirm zu ermöglichen. Dabei sollte jeder Nutzer ggf. einen komplett anderen Bildinhalt wahrnehmen können. Abgesehen von „Layered 3D“ und Systemen, die auf Mikrolinsenrastern basieren, ist kein weiteres Verfahren dazu in der Lage diese Anforderungen ohne Modifikationen zu erfüllen. In diesem Kapitel sollen einige Ansätze und die damit verbundenen Herausforderungen näher betrachtet werden.

3.1 Herausforderungen beim optischen Multiplexverfahren

Durch die Gebundenheit der Anaglyphen-Farbcodierung an Kombinationen aus zwei, zueinander komplementären, Farben scheidet die gleichzeitige Nutzung mehrerer unterschiedlicher Brillen aus. Verfahren auf der Basis von Wellenlängenfiltern lassen sich ebenfalls nicht untereinander kombinieren. Der Grund hierfür liegt darin, dass der Unterschied zwischen zwei Wellenlängen für die „gleiche“ Farbe ausreichend groß sein muss, damit die Funktionsfähigkeit der Filter erhalten bleibt.

Bei der Nutzung des Polarisationsverfahrens werden nur jene Lichtwellen blockiert, die nach der Linearisierung durch die brillenseitige $\lambda/4$ -Platte das lineare Polfilter in einem 90° -Winkel bezüglich seiner Durchlassachse treffen. Lichtwellen, die in einem geringfügig anderen Winkel den Filter treffen, werden durchgelassen. Folglich ist der Einsatz der Kombination aus λ/n -Platten und linearen Polarisationsfiltern, selbst bei frei wählbaren Winkeln zwischen Verzögerungsplatte und dem Polfilter sowie einem beliebigen „n“, für den Multiuserbetrieb nicht geeignet.

Auch die Zusammenstellung unterschiedlicher optischer Multiplexverfahren ist nicht immer erfolgreich. Beispielsweise würde die leichte Farbverfälschung durch die Polfilterbrille eine gleichzeitige Benutzung von Wellenlängen-Filtern mit hoher Wahrscheinlichkeit schwer möglich machen, da die letzteren sehr sensibel auf die Änderungen der Wellenlängen des einfallenden Lichts reagieren. Das könnte ggf. dazu führen, dass die Filter, die auf sehr spezifische Frequenzbereiche des Lichts geeicht sind, ihrer Funktion nicht mehr nachkommen.

Eine mögliche Lösung besteht aus einer Kombination von Anaglyphen-Filtern und Polarisationsbrillen. Hierbei wird das Polarisationsverfahren für die Nutzertrennung eingesetzt. Die Farbfilter übernehmen die Realisierung der S3D-Darstellung, d. h. die Trennung des linken und rechten Bildes. Im Gegensatz zu Wellenlängenfiltern, decken Anaglyphen-Filter größere Bereiche des sichtbaren Spektrums ab und werden daher durch die Farbverfälschung der Polfilter weitaus weniger beeinflusst. Die Nachteile dieses Lösungsansatzes liegen in der Summe der Nachteile beider Verfahren. So wird neben einer starken Farbverfälschung eine große Menge Licht absorbiert, was zu dunklen Bildern führt. Bedingt durch die Einschränkungen der Polarisierungstechnik, ist die maximale Nutzeranzahl auf zwei beschränkt. Beim Betreiben dieser Lösung auf einem S3D-LCD-TV wird die mögliche Bildauflösung pro Nutzer konstruktionsbedingt halbiert.

3.2 Herausforderungen bei zeitlichen Multiplexverfahren

Herkömmliche *Shutterbrillen* sind so konstruiert, dass der linke und der rechte Shutter in einem Takt zwischen 120 Hz und 144 Hz ausgelöst werden. Dieser einfache Algorithmus aus konventioneller 3D-Hardware ist für eine Multiuser-Anwendung jedoch nicht ausreichend. Soll die Shutterbrille nicht mit einem weiteren Multiplexverfahren kombiniert werden, so ist es zwar immer noch erforderlich, dass die Shutter der jeweiligen Brille nacheinander ausgelöst werden, jedoch nicht bei allen Nutzern gleichzeitig.

Der Grund dafür liegt darin, dass neben der Berücksichtigung der richtigen Bildseite auch die Nummer bzw. Reihenfolge des Nutzers berücksichtigt werden soll. Dazu muss zuerst beim 1. Nutzer zunächst das linke und dann das rechte Bild gezeigt werden. Erst danach wird das Verfahren beim 2. Nutzer wiederholt. Die Tabelle 1 soll den o.g. Ablauf veranschaulichen.

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------|---|---|---|------------|---|---|---|------------|---|---|---|------------|---|---|--|
| Nutzer | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | | | | | | | | |
| Bild | Bild 1 (L) | | | | Bild 1 (R) | | | | Bild 2 (L) | | | | Bild 2 (R) | | | |
| Shutter (L/R) | O | Z | Z | Z | Z | O | Z | Z | Z | Z | O | Z | Z | Z | O | |
| t | 1 | | | | | | | | 2 | | | | | | | |

L ... Links;

R ... Rechts;

O ... offen;

Z ... zu

Tabelle 1: Shutter-Only Algorithmus

Derzeit kommt für diese Lösung nur ein Multi-Beamer-System infrage. Es werden je Nutzer zwei Beamer benötigt. Dabei muss jeder Beamer mit einem eigenen Shutter versehen werden, wobei diese synchron zu den Verschlüssen auf den Brillen ausgelöst werden müssen. Dies kann sowohl durch Flüssigkristall-Shutter als auch mechanisch (zumindest auf der Seite des Beamers) mit einer Verschlusscheibe realisiert werden. Diese Lösung wurde bereits an der Bauhaus-Universität Weimar realisiert [Wei04].

Für eine Umsetzung an einem LCD-TV müsste das Gerät eine Bildwiederholrate von mindestens $n \cdot 120$ Hz unterstützen, wobei n die Nutzeranzahl ist. Obwohl viele Bildschirme mit Bildraten von teilweise bis zu 700 Hz beworben werden, liegt die tatsächliche Bildfrequenz, die von LC-Anzeigen derzeit verarbeitet werden kann bei 144 Hz.

In einer weiteren Lösungsmöglichkeit lassen sich die *Shutterbrillen mit den Polarisationsfiltern* kombinieren. Die Shutter übernehmen hierbei die Nutzertrennung und die Polfilter sorgen für die S3D-Darstellung. Im Vergleich zum vorherigen Verfahren muss ein LC-Bildschirm eine Frequenz von mindestens $n \cdot 60$ Hz unterstützen. Das LC-Panel muss dabei, wie bei handelsüblichen Geräten mit passiver Filterung, zeilenweise (zirkulär) polarisiert sein. Im Fall einer Multibeamer-Anlage halbiert sich die Anzahl der nötigen Beamer, insofern 3D-fähige Beamer verwendet werden können. Diese Umsetzung eines multi-user-fähigen S3D-Verfahrens wurde bereits von der Barco GmbH in Form eines „Virtual Surgery Table“ realisiert [Bar04].

3.3 Bestimmung der Nutzerposition

Ein essenzieller Bestandteil von VR-orientierten multi-user-fähigen S3D-Anwendung, ist die Fähigkeit der Software die Position des Betrachters in Relation zum virtuellen Raum zu bestimmen. Gewöhnliche stereo- und multiskopische 3D-Systeme erzeugen zwar den Eindruck eines dreidimensionalen Raums, nehmen aber keine Rücksicht darauf, ob sich der Nutzer bewegt. Wechselt der Betrachter seine Position, erscheinen die virtuellen Objekte immer noch aus der gleichen Perspektive. Mithilfe von Motion Tracking lässt sich die Ortsveränderung des Nutzers ermitteln und die Position sowie die Drehung der virtuellen Objekte entsprechend in Echtzeit anpassen. Damit werden VR-Darstellungen bei einer ausreichend großen Bildschirmfläche vollständig in den realen Raum „integriert“.

Dieses Problem repräsentiert einen eigenständigen und vielschichtigen Themenkomplex und ist daher nicht Bestandteil dieser Arbeit. Da aber ebensolche Anwendungsfälle, wie VR, der primäre Grund für die Umsetzung multi-user-fähiger S3D-Lösungen sind, sollte der Aspekt von Motion Tracking an dieser Stelle zumindest erwähnt worden sein.

4 Kombination von Multiplexverfahren

In dem vorangehenden Kapitel wurden mehrere Möglichkeiten erwähnt, wie unterschiedliche Multiplexverfahren für den Multiuser-S3D-Einsatz kombiniert und erweitert werden können. Im folgenden Teil der Arbeit werden zwei dieser Verfahren exemplarisch realisiert und näher untersucht. Aufgrund der Aspekte, die im Kapitel 3 beschrieben wurden, wird zum einen die Anaglyphen-Polfilter-Kombination und zum anderen die Polfilter-Shutter-Kombination betrachtet (Abbildung 7). Die einzelnen Bildtrennungs-Verfahren, auf welchen diese Zusammensetzungen aufbauen, sind gut untereinander kombinierbar. In Relation zu anderen Verfahren, haben die gewählten Techniken außerdem einen guten Kosten-Nutzen-Faktor und lassen sich ohne kostenintensive und aufwendige Modifikationen am Bildschirm umsetzen.

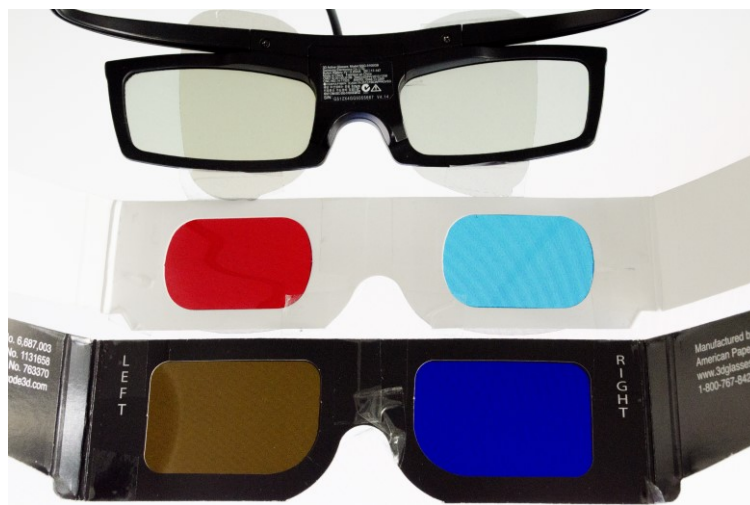


Abbildung 7: Multi-user-fähige Filterbrillen

Zu den Untersuchungsschwerpunkten gehören folgende Aspekte:

- Bildqualität
 - Helligkeit
 - Farbwiedergabe
 - Räumliche Wahrnehmung (S3D-Effekt)
- Qualität der Bildtrennung
 - S3D-Trennung
 - Nutzertrennung
- Maximale Nutzeranzahl (theoretisch)
- Aufwand

Dazu werden sowohl subjektive Tests mit Probanden, als auch objektive Tests durchgeführt. Alle Experimente werden so aufgebaut, dass ein Zwei-Nutzer-Betrieb simuliert wird.

4.1 Generierung von S3D-Inhalten

Insbesondere für die subjektive Qualitätsbegutachtung durch Probanden werden S3D-Inhalte benötigt. Um für gleiche Ausgangsbedingungen bei allen Probanden zu sorgen und den Einfluss vorheriger Erfahrungen sowie möglicher Störfaktoren auf ein Minimum zu reduzieren, werden hierfür minimalistische virtuelle Umgebungen mithilfe von Autodesk 3ds Max 2014 erzeugt. Die Szene besteht aus vier virtuellen Kameras (zwei Kameras je Nutzer, eine Kamera pro Auge) und sieben 3D-Objekten. In diesem Fall wurde ein 3D-Modell eines Wohnhauses verwendet [3dMod]. Dabei befindet sich das zentrale Objekt mit seinem geometrischen Mittelpunkt in der Ebene der Null-Parallaxe. Die restlichen Objekte befinden sich jeweils vor bzw. hinter dieser Ebene (Abbildung 8). Die virtuellen Kameras befinden sich in einer Entfernung von ca. 245 cm vom zentralen Objekt (graues Gebäude) und 100 cm über der Bodenfläche. Der Abstand der Kameras innerhalb eines Kamerapaars beträgt 6 cm.

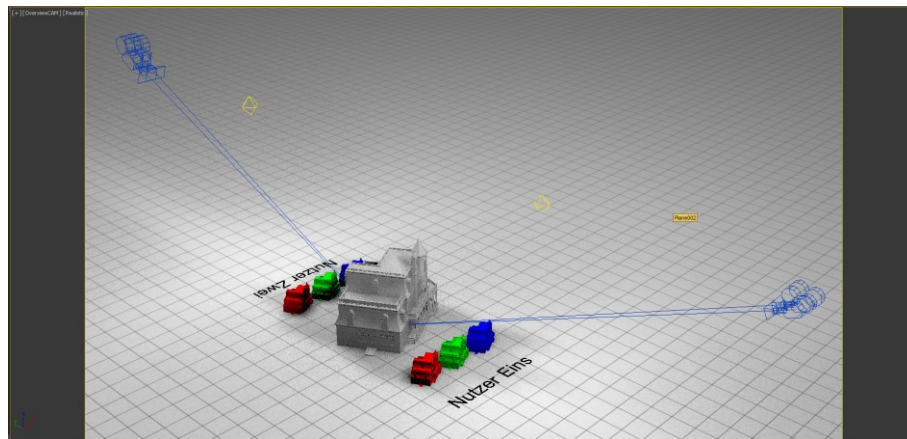
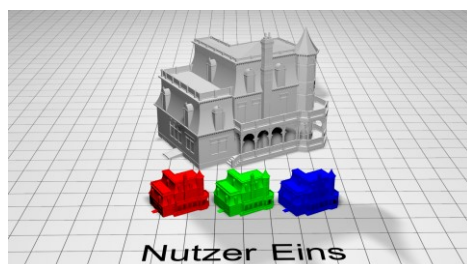
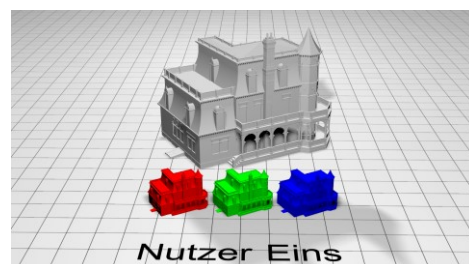


Abbildung 8: Aufbau der VR-Umgebung (basierend auf [3dMod])

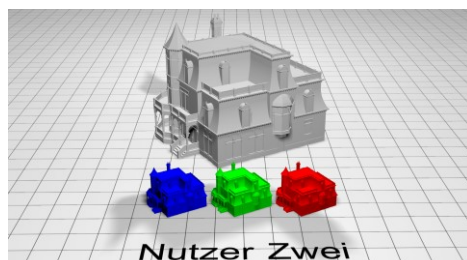
Nachdem die Ansichten aller virtuellen Kameras gerendert wurden, entstehen insgesamt vier Bilder mit einer Auflösung von jeweils 1920 x 1080 Pixel (Abbildung 9).



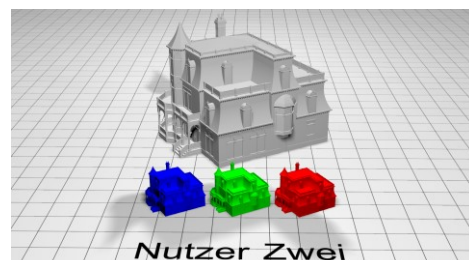
Nutzer Eins – linkes Bild



Nutzer Eins – rechtes Bild



Nutzer Zwei – linkes Bild



Nutzer Zwei – rechtes Bild

Abbildung 9: Gerenderte Szene (basierend auf [3dMod])

4.2 Anaglyphenfilter und Polarisationsfilter

Die Umsetzung dieses Systems ist mit dem geringsten Aufwand verbunden. Es wird eine geringe Bildqualität erwartet. Die maximale Nutzeranzahl ist, bedingt durch die Beschaffenheit des LC-Panels mit alternierend polarisierten Pixelzeilen, auf maximal zwei Nutzer begrenzt.

4.2.1 Konfiguration der Filterbrille

Die Filter werden derart kombiniert, dass die Anaglyphenfilter die Bildtrennung für das rechte und das linke Auge übernehmen und die Polfilter für die Trennung zwischen den Nutzern eingesetzt werden. Es werden zirkulare Polarisationsfilter aus RealD 3D-Brillen eingesetzt. Eine entsprechende Filterkombination ist in der Abbildung 11 dargestellt.

Würden hingegen die Farbfilter zur Nutzertrennung eingesetzt werden, würde jeder Nutzer, ein monochromes Bild sehen. Bei der hier aufgeführten Konfiguration wird das Anaglyphen-Trennungsverfahren für S3D nicht verändert. Dadurch bleibt nach der Fusion des rechten und linken Teilbildes die Farbinformation des Originalbildes teilweise erhalten.

Es ist essenziell, dass die Polfilter *vor* das Farbfilter angebracht werden. Diese Einschränkung ist damit begründet, dass Kunststofffolien, auf welchen die Anaglyphenfilter basieren, Eigenschaften aufweisen, die denen der Verzögerungsplatten ähnlich sind. Dadurch wird die zirkulär polarisierte Lichtwelle hinsichtlich der Phasenverschiebung der Teilwellen gestört. Das führt dazu, dass die Lichtwelle nach einer weiteren Transformation durch die $\lambda/4$ -Platte auf der RealD-Brille nicht mehr vollständig linear ist. Eine unsaubere Filterung wäre die Folge. Ein Beispiel dafür ist in der Abbildung 10 zu finden.

Die Bilder wurden mit einer Nikon D5100 aufgenommen, die hinter der Brille positioniert wurde. Vor der Brille befindet sich in ca. 50 cm Entfernung ein S3D-Monitor mit zeilenalternierender Polarisation. Das Bild auf dem Monitor ist in allen geraden Zeilen schwarz und in allen ungeraden Zeilen weiß. Der Polfilter wurde so ausgewählt, dass nur die schwarzen Zeilen zu sehen sein sollten. Dies ist im linken Bild der Fall. Im rechten Bild wird die Filterung in einigen Bereichen aufgehoben, sodass die weißen Zeilen zu sehen sind. Die Farbinformation wurde für bessere Erkennbarkeit des eintretenden Effektes aus den Fotos entfernt.

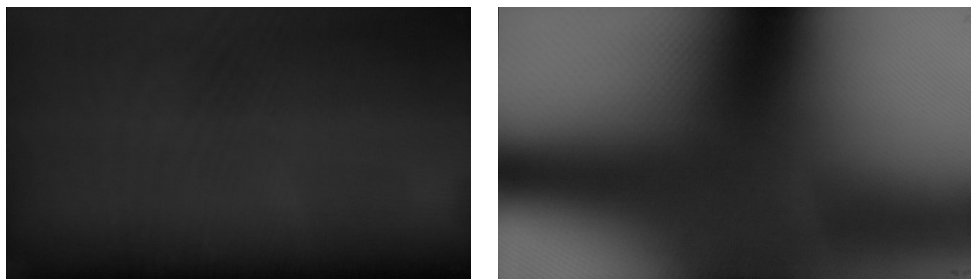


Abbildung 10: Position des Polfilters

links: Polfilter vor Anaglyphenfilter, rechts: Polfilter hinter Anaglyphenfilter

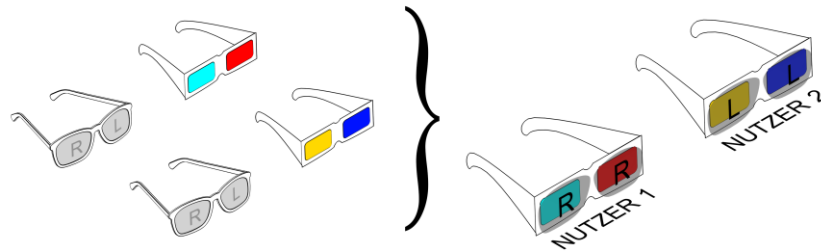


Abbildung 11: Filterzusammenstellung

links: Ausgangsbrillen, rechts: Multiuser-Brillen

Die Wahl der Filterfarben spielt zwar für die Trennungseigenschaften kaum eine Rolle, wirkt sich jedoch geringfügig auf die Wahrnehmung der Farben aus. So ist, z. B. bei der Kombination Rot-Cyan ein Bild mit einer höheren Farbtemperatur zu erwarten, als bei der Kombination Magenta-Grün. Im Rahmen dieser Arbeit werden beispielhaft die Anaglyphen-Zusammenstellung Rot-Cyan und Blau-Gelb (ColorCode-3D) untersucht. Die Farben Rot und Cyan sind bei Anaglyphen-Brillen am weitesten verbreitet. Die ColorCode-3D Technik ist zwar weniger bekannt, jedoch wird diesem Anaglyphen-Verfahren eine bessere Farbwiedergabe zugeschrieben [3djr].

4.2.2 Erstellung des Testbildes für den subjektiven Test

Die Bilder, die mithilfe des 3D-Editors erstellt wurden, müssen nun für das Anaglyphenverfahren bearbeitet und zusammengefasst werden. In diesem Fall erfolgte die Bearbeitung mit Adobe After Effects CS6.

Im ersten Schritt werden die eigentlichen Anaglyphenbilder erstellt. Dazu wird in After Effects für jeden Nutzer bzw. jedes Stereobildpaar eine Komposition angelegt. Die Auflösung der Komposition ist auf 1920 x 1080 einzustellen. Die Dauer und die Bildrate sind für diesen Versuch irrelevant. Die gerenderten Bilder werden als neue Ebenen importiert. Um die nötige Farbmischung zu realisieren wird das Filter „Kanalmixer“ verwendet (Channel Mixer in der eng. Version, siehe Abbildung 13).

Die Bilder werden mit folgenden Werten zu (voll-)farbigen Anaglyphen umformatiert:

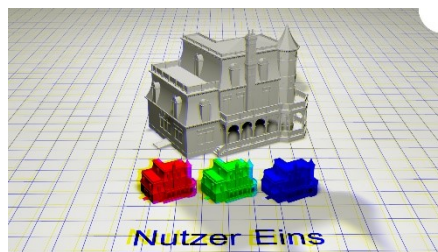
| Anaglyphentyp | Rot-Cyan Anaglyphen | | Gelb-Blau Anaglyphen (ColorCode 3D) | |
|------------------------|-------------------------|---|---|---------------------------|
| Bild | Linkes Bild | Rechtes Bild | Linkes Bild | Rechtes Bild |
| Filterparameter | Rot-Rot: 100 Rest: 0 | Grün-Grün: 100 Blau-Blau: 100 Rest: 0 | Rot-Rot: 100 Grün-Grün: 100 Rest: 0 | Blau-Blau: 100 Rest: 0 |
| Ergebnis | rotes Bild | cyanes Bild | gelbes Bild | blaues Bild |

Tabelle 2: Kanalmixer-Parameter [Wim15]

Nun müssen das linke und rechte Teilbild in eine Anaglyphendarstellung fusioniert werden. Dazu wird für die obere Ebene jeweils die Füllmethode „Differenz“ ausgewählt (eng. Mode: Difference). Um später die Qualität der Nutzertrennung begutachten zu können, werden in die einzelnen Nutzerkompositionen in den oberen Bildecken ¼-Kreise positioniert (rechts oben für Nutzer eins, links oben für Nutzer zwei). Die Abbildung 12 stellt das vorläufige Ergebnis der obigen Schritte dar.

Kombination von Multiplexverfahren

Im zweiten Schritt werden die Anaglyphenbilder derart zusammengesetzt, dass eine Nutzertrennung auf einem handelsüblichen Fernseher möglich wird. Als Bildwiedergabegerät wird das LCD-TV mit der Modellnummer 55PFL7008K/12 eingesetzt. Es handelt sich um ein 3D-fähiges Fernsehgerät auf der Basis von Polarisationsfiltern mit einer Auflösung von 1920 x 1080 Pixel. Als Ergebnis der Zusammensetzung der einzelnen Nutzeransichten soll ein Bild entstehen, bei dem in jeder geraden Pixelzeile das Bild des ersten Nutzers zu sehen ist. Entsprechend muss in jeder ungeraden Zeile das Bild des zweiten Nutzers zu sehen sein. Zunächst müssen die Kompositionen für die einzelnen Nutzer in eine Gesamtkomposition zusammengefasst werden. Danach wird (an der obersten Position) eine neue Ebene erstellt und mit dem Filter „3D-Glasses“ versehen (siehe Abbildung 14). Der Parameter für die linke Ansicht wird auf die Ansicht des ersten Nutzers eingestellt und der Parameter für die rechte Ansicht entsprechend auf den Nutzer zwei. Für das Feld „3D-View“ wird die Einstellung „Interlaced Upper L Lower R“ ausgewählt. Das finale Testbild ist in der Abbildung 15 zu sehen. Das Testbild wird als eine PNG-Datei gerendert.

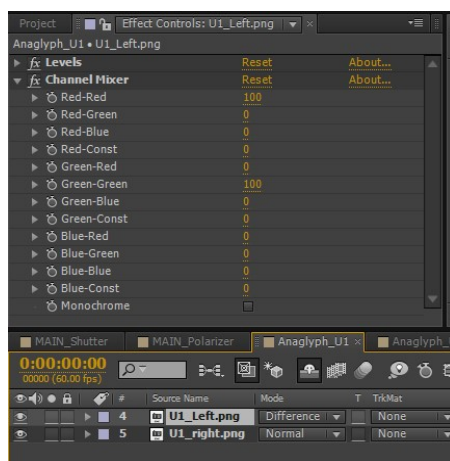


*Links: Bild für Nutzer Nr. 1
Rot-Cyan codiert*

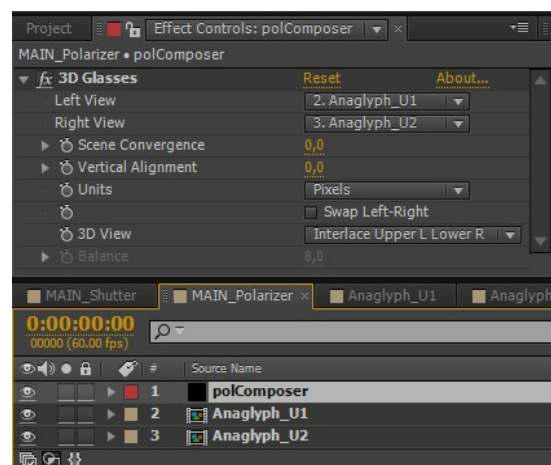


*Rechts: Bild für Nutzer Nr. 2
Gelb-Blau codiert*

Abbildung 12: Anaglyphenbilder (basierend auf [3dMod])



*Abbildung 13: Screenshot – Kanalmixer
(Screenshot)*



*Abbildung 14: Screenshot - 3D-Glasses Filter
(Screenshot)*

4.2.3 Subjektiver Test - Durchführung

Im Rahmen eines Experimentes mit insgesamt neun Probanden wird das Anaglyphen-Polfilter Verfahren hinsichtlich der Qualität der Bilder und der S3D-Darstellung geprüft. Als Bild- bzw. Signalquelle wird ein Laptop verwendet, der über HDMI an den Bildschirm angeschlossen ist.

An jedem Testlauf nimmt jeweils ein Proband gleichzeitig teil. Vor Beginn des Experiments müssen die Teilnehmer ihr Alter und ggf. vorliegende Sehstörungen mitteilen. Die Nutzung von Sehhilfen (Brillen oder Kontaktlinsen) wird gestattet und entsprechend im Protokoll vermerkt. Bevor die Bewertung des Testbildes vorgenommen wird, werden zwei Referenzbilder auf dem Bildschirm dargestellt. Es handelt sich ebenfalls um S3D-Bilder, welche für die Links-Rechts-Trennverfahren des Fernsehschäfers optimiert wurden, aber nicht multi-user-fähig sind. Sie sollen bei der Qualitätsbewertung als Orientierung dienen. Im nächsten Schritt setzt der Testteilnehmer eine der modifizierten 3D-Brillen auf (Abbildung 11, rechte Seite). Daraufhin wird das Testbild (siehe Abbildung 15) auf dem Fernseher angezeigt.

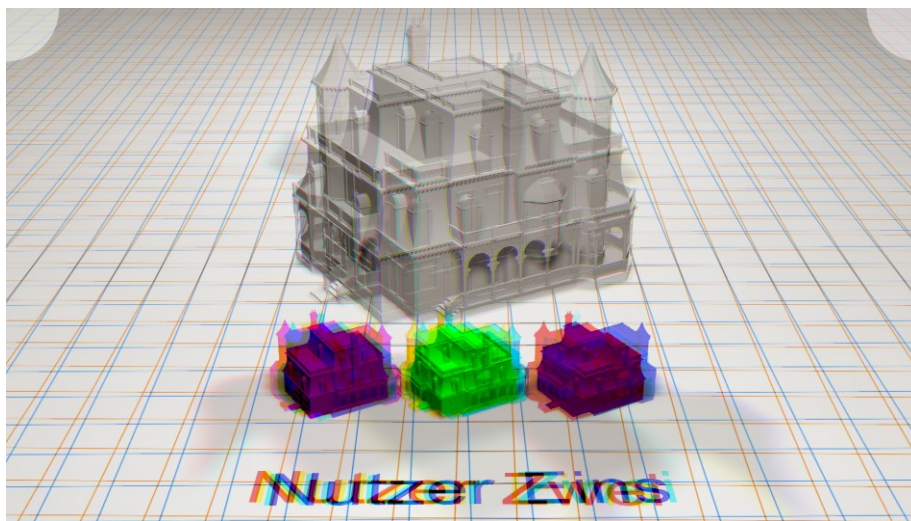


Abbildung 15: Fertiges Testbild (basierend auf [3dMod])

Nun muss der Proband Fragen hinsichtlich der Bildqualität beantworten, darunter die Farbwiedergabe und die Bildhelligkeit. Anschließend soll geklärt werden, inwiefern der S3D-Effekt wahrnehmbar war und ob der Ghosting-Effekt aufgetreten ist. Dabei wird die Filterfunktion der Nutzertrennung anhand der weißen $\frac{1}{4}$ -Kreise bewertet: Im Idealfall sollte durch eine Brille auch nur ein Kreisviertel zu sehen sein. Die Qualitätsmerkmale werden auf einer Skala von eins bis fünf bewertet, wobei „fünf“ der Qualität des Referenzbildes entspricht. Es werden zwei Anaglyphentypen gleichzeitig getestet: Rot-Cyan und Colorcode 3D (Gelb-Blau). Die Brillen können nach dem Ermessen des Probanden getauscht werden. Die Referenzbilder können von der Testperson auch jederzeit wieder aufgerufen werden.

4.2.4 Subjektiver Test – Auswertung

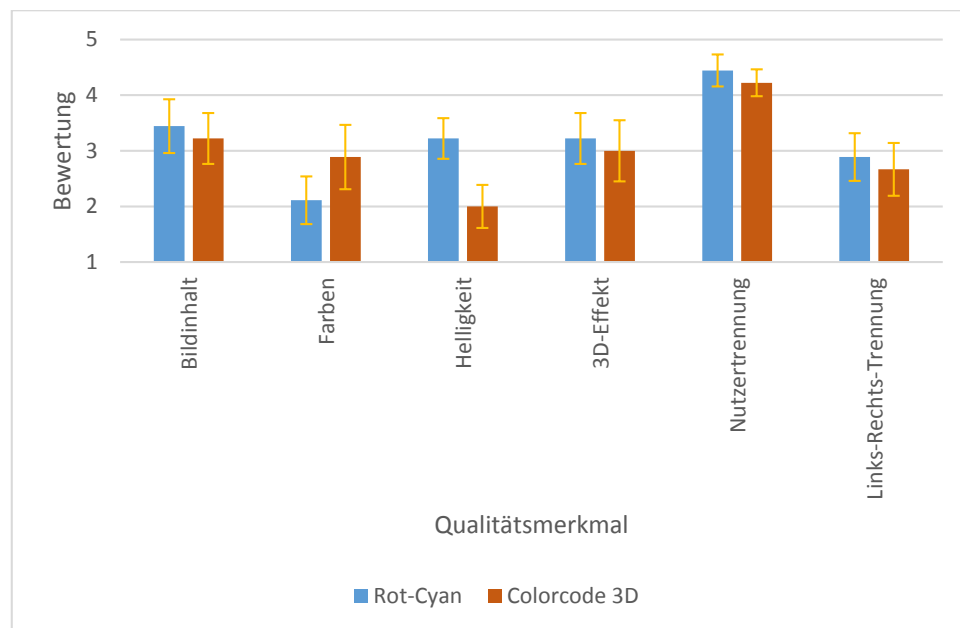


Abbildung 16: Auswertung des Tests
(Die Bewertung „5“ entspricht der Qualität des Referenzbildes)

Bei allen Testpersonen erwies sich die Nutzertrennung als grundsätzlich funktionsfähig, wobei ein Ghosting-Effekt von mittlerer Stärke aufgetreten ist. Der Bildinhalt aus dem Referenzbild konnte stets wiedererkannt werden.

Ein entscheidender Nachteil dieses Systems besteht in den Farbfiltern, wodurch es zu einer starken Farbverfälschung kommt. Bei der Rot-Cyan-Brille konnte eine besonders prägnante Farbverzerrung im roten und teilweise im blauen Farbanteil festgestellt werden. Auch ein S3D-Effekt konnte wahrgenommen werden, allerdings wurde dieser hinsichtlich der Qualität mit mittel eingestuft.

Im Vergleich dazu wurde die Farbwiedergabe bei der Colorcode 3D Brille besser bewertet. Die stärkste Farbverfälschung ist im blauen Farbanteil aufgetreten. Dieser Farbbereich wurde als besonders dunkel (fast schwarz) empfunden. Insgesamt hatte die Gelb-Blau-Brille einen stärkeren Einfluss auf die Bildhelligkeit: Die verbliebene Helligkeit wurde im Durchschnitt mit 25% angegeben. Bezüglich des S3D-Effektes wurde die Brille geringfügig schlechter bewertet als ihr Rot-Cyanes Gegenstück.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die zwei Anaglyphentypen sich nur in zwei Punkten signifikant voneinander unterscheiden. Während die Colorcode 3D Brille sich durch eine bessere Farbwiedergabe auszeichnet, punktet die Rot-Cyan-Brille mit einer etwas besseren Bildhelligkeit. Jedoch kann weder mit der einen noch mit der anderen Brille die Qualität des Referenzbildes erreicht werden.

4.2.5 Objektiver Test

In diesem Versuch werden Messungen mit einem Spektrometer (SpectraScan® Spectroradiometer PR-670) für die verwendeten Filter durchgeführt. Das Spektralverhalten jedes Farbfilters (inklusive des Polarisationsfilters, welcher vor dem Farbfilter befestigt ist), wird in einer separaten Messung erfasst. Der Raum, in dem die Vermessung stattfindet, wird entsprechend abgedunkelt. Das Messgerät wird

mittig und in einem rechten Winkel zum Bildschirm aufgestellt. Die Entfernung zum Bildschirm beträgt ca. 1 cm. Vor dem Testen der verschiedenen Filter, werden zunächst Referenzwerte für den Versuchsbildschirm aufgenommen. Diese können in den Abbildungen 17 bis 20 eingesehen werden. In der Abbildung 18 ist das Spektralverhalten des Testbildschirms dargestellt, während ein weißes Bild gezeigt. Für eine bessere Aufschlüsselung wurden die Grundfarben Rot, Grün und Blau auch einzeln gemessen. Das Spektralverhalten und die Leuchtdichte für jede dieser Farben wurde jeweils in einer separaten Messung erfasst, wobei bei jedem Messvorgang jeweils nur eine der Farben an den Bildschirm übertragen wurde (Abbildungen 19 und 20).

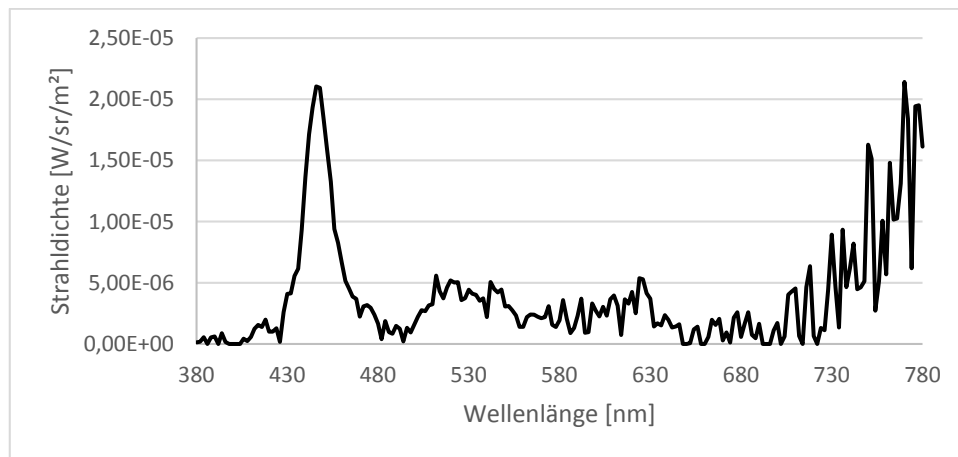


Abbildung 17: Referenz – Schwarz

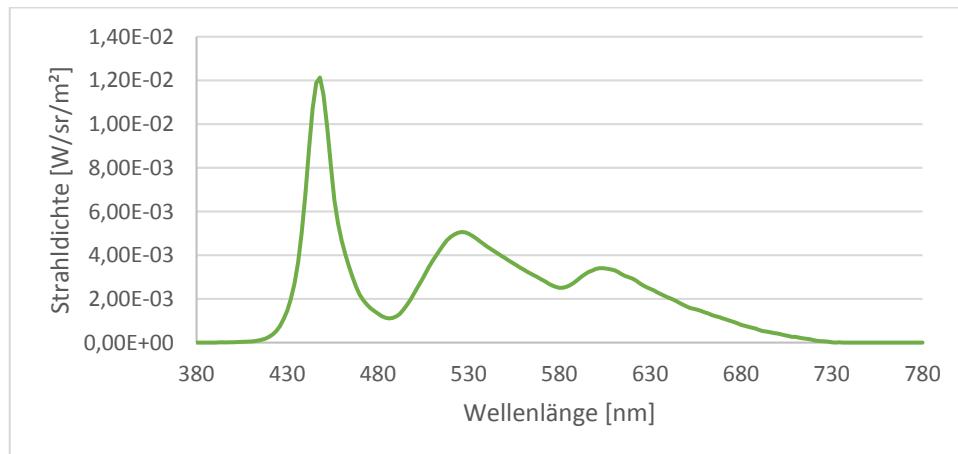


Abbildung 18: Referenz – Weiß

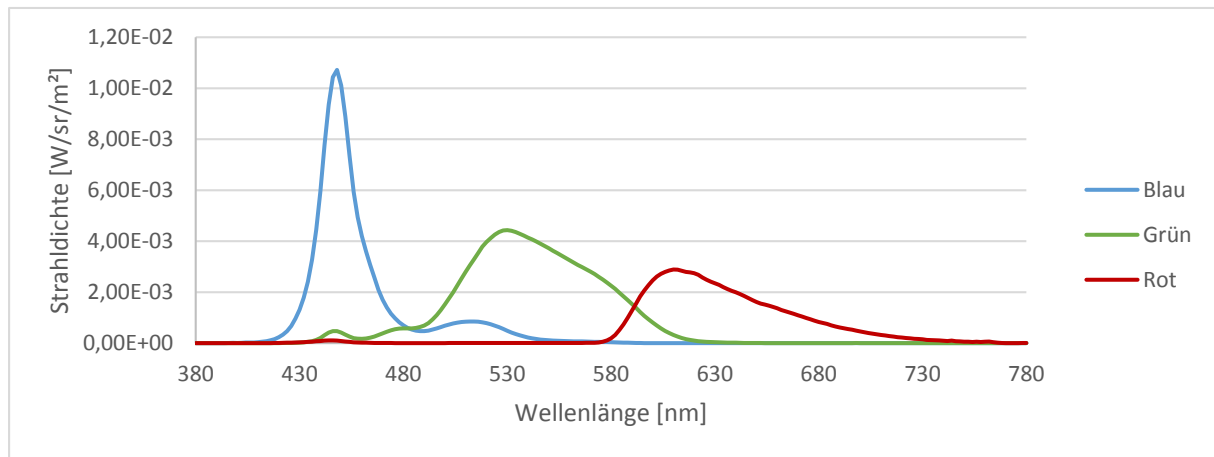


Abbildung 19: Referenz – RGB-Spektrum

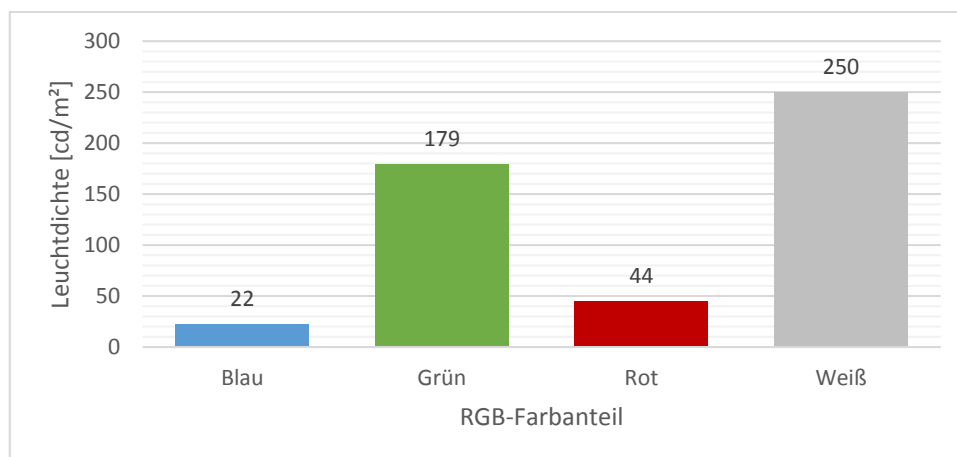


Abbildung 20: Referenz – Leuchtdichte

Besonders auffällig ist der hohe Lichtverlust, insbesondere beim ColorCode 3D System. Im hellsten (gelben) Kanal ergeben sich mit 8 cd/m² weniger als 0,1% der ursprünglichen Leuchtdichte. Die maximale Leuchtdichte der Rot-Cyan Brille beträgt auf dem hellsten Farbkanal (Cyan) mit 42 cd/m² das 6-fache der blau-gelben Variante (Abbildung 21). Selbstverständlich wirken sich nicht nur die Farbfilter auf die Bildhelligkeit aus: Bedingt durch die Funktionsweise des Polarisationsverfahrens auf einem LCD-TV (Abbildung 6), blockieren die Polfilter die Hälfte aller verfügbaren Pixelzeilen. Damit wird die Leuchtdichte weiter reduziert.

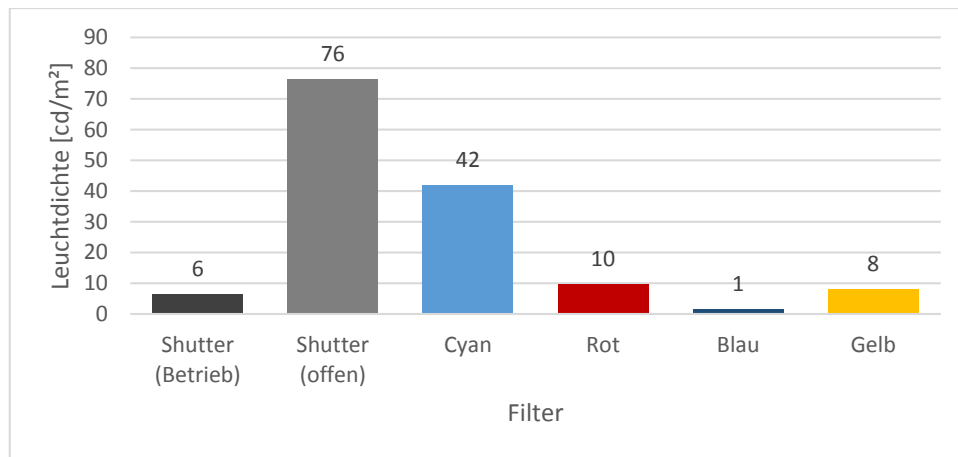


Abbildung 21: Leuchtdichte – Filter

Die Analyse des Lichtspektrums zeigt, dass die Farbfolien und das LC-Panel nicht aufeinander abgestimmt sind. Die Bandbreite für einzelne Farbkomponenten fällt bei den Filtern deutlich geringer aus (Abbildungen 22 und 23). Dadurch geht ein Teil der Farbinformation verloren, was die Wiedergabe der Farben zusätzlich beeinträchtigt. Auch die Zentrierungen der Wellenlängen im roten Lichtanteil weichen voneinander ab. Das Maximum der Strahldichte des Filters ist gegenüber der Flüssigkristallanzeige des TVs um +12 nm verschoben (Abbildung 22).

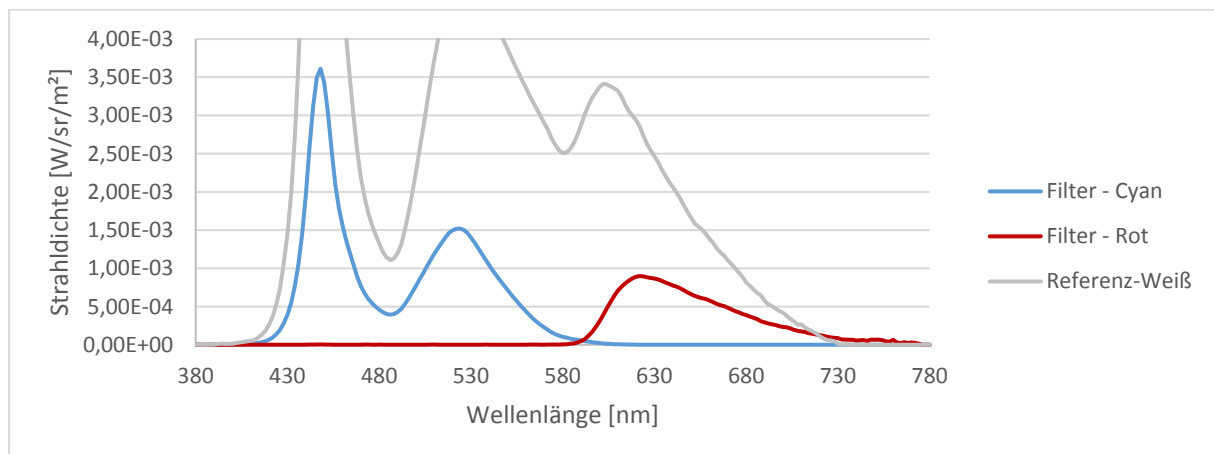


Abbildung 22: Rot-Cyan-Anaglyphen

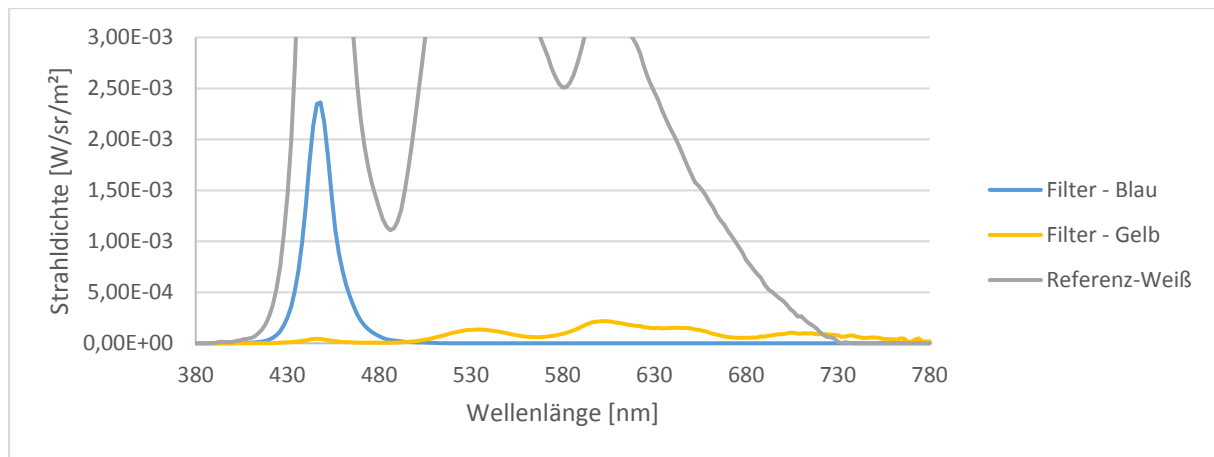


Abbildung 23: Rot-Cyan-Anaglyphen

Hinsichtlich der Links-Rechts-Trennung unterscheiden sich die Verfahren kaum: In beiden Fällen deckt eines der Filter einen Bereich des sichtbaren Spektrums ab. Dieser Bereich überschneidet sich nicht bzw. nur äußerst gering mit dem spektralen Band des Antagonisten-Filters.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Rot-Cyan Brille, bedingt durch das bessere Verhalten hinsichtlich der Bildhelligkeit, die bessere Alternative darstellt.

4.3 LC-Shutter und Polarisationsfilter

4.3.1 Konfiguration der Filterbrille

In dieser Kombination übernehmen die LC-Shutter die Nutzertrennung und die Polfilter trennen die Teilbilder der S3D-Darstellung voneinander. Ebenso wie bei der Konfiguration der Anaglyphen- und Polfilter ist die Anordnung der einzelnen Komponenten auch hier entscheidend. Da LC-Shutter aufgrund ihrer Beschaffenheit (siehe Kapitel 2.3) Lichtwellen linear polarisieren und damit das S3D-Polarisationsverfahren beeinträchtigen würden, müssen die Polfilter der RealD-Brillen *vor* den Flüssigkristallverschlüssen angebracht werden. Bei diesem Aufbau ist außerdem der Winkel zwischen den Bauelementen entscheidend: Steht die lineare Polarisationskomponente des passiven Filters senkrecht zur Durchlassrichtung der linearen Polfilterschichten der Shutterbrille, wird das meiste Licht blockiert. Dies hat zur Folge, dass die RealD-Brille sich nicht vor der Shutterbrille positionieren lässt. Die passiven Filter müssen zunächst ausgebaut und in einem Winkel von $\pm 90^\circ$, in Relation zur ursprünglichen Ausrichtung vor den Flüssigkristallverschlüssen angebracht werden. Zum Erreichen der Nutzertrennung müssen beide LC-Shutter einer Brille gleichzeitig schließen und öffnen. Dazu muss die Schaltung der Shutterbrille modifiziert werden. Außerdem muss eine Erweiterung für die Zuführung eines externen Synchronisationssignals vorgenommen werden.

4.3.2 Modifikation der Shutterbrille

Vorbemerkung:

Modifikationen an der Hardware und Software der Shutterbrille sind von dem jeweiligen Hersteller nicht vorgesehen. Es werden daher ohne Weiteres weder Konstruktionspläne noch anderweitige Dokumentationen zur Verfügung gestellt. Aus diesem Grund mussten einige Daten und Modifikationen nach dem Trial-and-Error Prinzip ermittelt bzw. vorgenommen werden. Obwohl die Veränderungen an der Hardware mit größtmöglicher Sorgfalt sowie nach bestem Wissen und Gewissen getätigt wurden, erfolgt die Nutzung der modifizierten Shutterbrille auf eigene Gefahr.

Bei der Nutzertrennung im zeitlichen Bereich werden auf dem Bildschirm abwechselnd Bilder für den jeweiligen Betrachter dargestellt. Entsprechend müssen die Flüssigkristallverschlüsse bei allen Betrachtern geschlossen werden, für die die momentan gezeigte Darstellung nicht bestimmt ist. Dabei müssen bei dem jeweiligen Nutzer *beide* LC-Shutter *gleichzeitig* verschlossen bzw. geöffnet werden. Diese Funktionalität ist durch die Brillensteuerung meistens nicht vorgesehen [3dv10].

Eine weitere Herausforderung besteht in der Synchronisation der Shutterbrille mit dem TV bzw. Beamer. Dabei soll vermieden werden, dass die Shutter zwischen den Bildern auslösen, womit die Nutzertrennung unbrauchbar wäre. In den meisten aktiven S3D-Systemen werden drahtlose Verbindungen wie Funksignale oder Infrarot-Impulse eingesetzt. Alternativ kann die Brille durch einen Weiß-Impuls (DLP-Link) angesteuert werden. Für die hier erforderliche Konfiguration ist aber keines dieser Verfahren ohne weitere Modifikationen am Kommunikationsprotokoll nutzbar. Der Grund dafür liegt in der fehlenden Separation der Kommunikationskanäle für die einzelnen Brillen. Das hieße, dass die Impulsfolge für das Auslösen einer Brille unumgänglich alle baugleichen Brillen in Reichweite auslösen würde. Da die Entwicklung eines geeigneten Kommunikationsprotokolls und der dazugehörigen Hardware eher dem Zweck der Ergonomie und weniger der Funktionalität der Testanlage dienen würde, sollen die Brillen über eine Kabelverbindung synchronisiert werden. Unabhängig von diesem Aspekt liefern Bildwiedergabegeräte, die für passive S3D-Verfahren entwickelt wurden, keine Schnittstelle für die Ansteuerung aktiver 3D-Brillen. Eine Synchronisation mit der Wiedergabehardware bleibt jedoch unverzichtbar. Eine mögliche Lösung dieses Problems besteht in der Nutzung des Signals zur vertikalen Synchronisation, auch VSync genannt. [Tsi12] Die eigentliche Funktion von VSync-Impulsen besteht darin, den Anfang bzw. das Ende eines neuen Frames zu kennzeichnen. (Eine gleichnamige Softwareoption bei 3D-Anwendungen soll das „Zerreißen“ des Bildes verhindern indem Schreibzugriffe auf den Videospeicher der Grafikkarte solange blockiert werden, bis das komplette Einzelbild an den Bildschirm übertragen wurde.) Um einen korrekten Trigger-Algorithmus gewährleisten zu können, kann der VSync-Impuls an einen Mikrocontroller weitergeleitet werden. Bei analogen Übertragungsstandards für Videosignale, wie VGA und DVI-A, liegt das VSync-Signal auf einem separaten Pin an. Bei digitalen Standards wird dieses Signal allerdings codiert übertragen, was eine direkte Weiterleitung und Nutzung auf einem Mikrocontroller unmöglich macht. Um dieses Problem zu umgehen, bietet sich, im Falle der Nutzung eines HDMI-Anschlusses, ein HDMI-zu-VGA-Adapter an, der die Rolle eines „VSync-Extractors“ übernimmt.

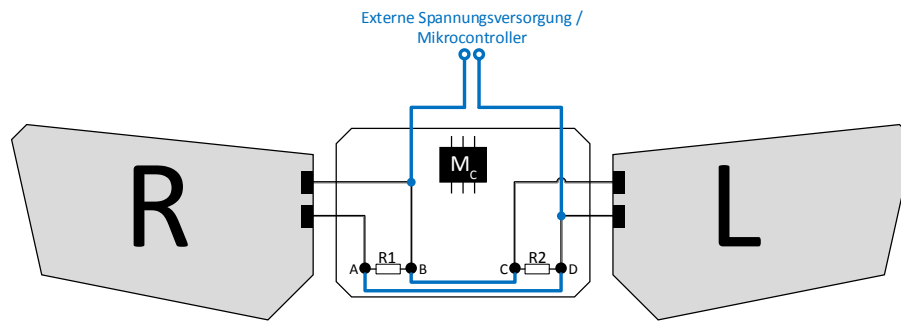


Abbildung 24: Aufbau der Shutterbrille

In der Abbildung 24 ist der innere Aufbau einer Shutterbrille grob dargestellt. Die Punkte A, B, C und D sind mit den LC-Shuttern verbunden. Wird an den Kontakten A und B eine elektrische Spannung von ca. 6 V angelegt, wird der rechte Shutter geschlossen (analog für den linken Shutter über C und D). Der Mikrocontroller M_C kann aus Gründen, die im vorherigen Abschnitt erläutert wurden, nicht genutzt werden. Die Ansteuerung der LC-Shutter erfolgt daher unmittelbar an den o.g. Anschlusspunkten über einen externen Mikrocontroller. Damit ist auch die Nutzung einer Batterie, die in solchen Brillen üblicherweise verbaut wird, nicht zur Spannungsversorgung erforderlich.

In einem vorangehenden Versuch wurde festgestellt, dass ein LC-Shutter, der an keine weiteren Bauelemente angeschlossen ist und kurzzeitig mit einer elektrischen Spannung versorgt wird, die Ladung für mehr als 30 s speichert und geschlossen bleibt. Dieses Verhalten entspricht dem eines Kondensators. Ein an die, in Abbildung 24 dargestellte, Schaltung angeschlossener Shutter wird hingegen sofort nach dem Entfernen der Spannung wieder durchsichtig. Außerdem konnte bei dieser Konfiguration ein kontinuierlicher Stromfluss von ca. 80 mA (± 10 mA) gemessen werden. Diese Beobachtungen lassen vermuten, dass die Punkte A und B bzw. C und D über Ableitwiderstände R_1 und R_2 verbunden sind. Diese ermöglichen eine schnelle Entladung des Stromkreises und beschleunigen das Öffnen der Shutter signifikant. Weitere Tests führten zur Erkenntnis, dass bei Strömen über 120 mA die Flüssigkristallverschlüsse wieder geöffnet werden. An dieser Stelle wird vermutlich ein Halbleiterbaustein „durchbrochen“. Ab einem (dauerhaften) Stromfluss über 130 mA bzw. 140 mA wird der integrierte Mikrocontroller M_C überlastet und zerstört. Ein Schaden an weiteren Bauelementen wird nicht ausgeschlossen, jedoch bleiben die LC-Shutter sowie die Ableitwiderstände hinsichtlich ihrer Primärfunktionen intakt.

Damit beide Flüssigkristallverschlüsse bei anliegender Spannung gleichzeitig undurchsichtig werden, werden die Punkte A und D sowie B und C miteinander verlötet. Anschließend werden die Punkte B und D mit einem Kabel verbunden, welches über eine Öffnung im Plastikgehäuse der Brille nach außen geführt wird. Die Brille lässt sich nun extern mit Spannung versorgen und steuern. Die hinzugefügten Leitungen sind in der Abbildung 24 blau dargestellt.

Die Steuerung der Brille wird durch einen, mit Arduino Uno kompatiblen, Mikrocontroller realisiert. Die maximale Stromstärke, die der Mikrocontroller zur Verfügung stellen kann, beträgt jedoch nur 40 mA pro I/O-Pin. Die maximale Spannung liegt bei 5 V. Wie weiter oben bereits erwähnt wurde, benötigt die Brille eine Spannung von 6 V und einen Strom von mindestens 80 mA. Durch die folgende (externe) Verstärkerschaltung soll das Problem gelöst werden:

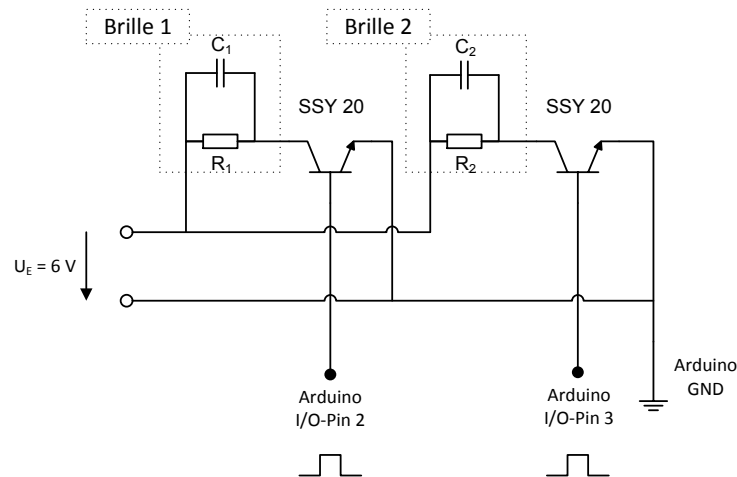


Abbildung 25: Verstärkerschaltung

Der Aufbau wird über ein Netzteil mit einer Spannung von 6 V versorgt. Der Stromfluss zu den LC-Verschläüssen wird über NPN-Transistoren geregelt. Die Basis des jeweiligen Transistors ist mit einem digitalen I/O-Pin der Arduino-Platine verbunden. Die Schaltung ist für maximal zwei aktive S3D-Brillen ausgelegt. Die Parallelschaltung aus Kondensator und Widerstand stellt das Ersatzschaltbild der Brille dar. Ein Stromfluss von mehr als 80 mA wird nicht benötigt, da immer nur eine der beiden Brillen zu einem Zeitpunkt „geschlossen“, d. h. mit Strom versorgt werden muss.

4.3.3 Konfigurationsparameter und Einschränkungen

Um die Shutterbrillen bei einem Bildwechsel zu einem korrekten Zeitpunkt öffnen und schließen zu können, muss die Arduino-Platine entsprechend konfiguriert werden. Bei Arduino kompatiblen Platinen wird üblicherweise die Programmiersprache C verwendet. Zur besseren Beschreibung der notwendigen Funktionalität wurde der folgende Zustandsautomat modelliert:

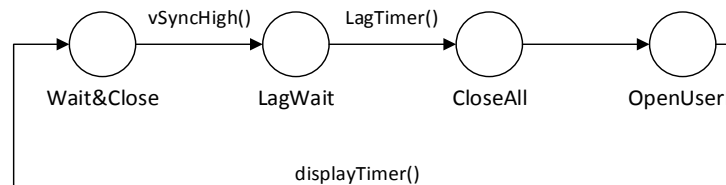


Abbildung 26: Zustandsautomat

Es handelt sich hierbei um eine eher minimalistische Lösung: Es werden bei jedem VSync-Impuls, nach dem Verstreichen der Darstellung-Verzögerungszeit (Display Lag) zunächst alle Brillen geschlossen. Dann wird die Brille desjenigen Nutzers geöffnet, der an der Reihe ist. Nach dem Ablauf der Expositionszeit des Frames T_f werden alle Brillen wieder geschlossen. T_f bezeichnet hierbei die Zeitspanne, in der die Shutter *nicht* mit Spannung versorgt werden. Dieser Vorgang wird über alle Nutzer hinweg zyklisch wiederholt. Die Nutzerabfolge wird standardmäßig danach definiert, welcher I/O-Pin der Arduino-Platine die jeweilige Brille steuert. Per Voreinstellung ist für den Nutzer Nr. 1 der I/O-Pin 2 vorgesehen. Bei der Nutzung eines mit Arduino-Uno kompatiblen Boards, sind (theoretisch) maximal acht Nutzer steuerbar. Diese Begrenzung wird durch die Anzahl der digitalen Pins an der Platine des Mikrocontrollers bedingt (Pins 2 bis 10). Der Pin 11 wird für die Nutzerumschaltung benötigt, während Pin 12 für den VSync-Impuls reserviert ist.

Die Zeit T_f ist hier nicht mit der Dauer eines Frames T_r zu verwechseln. Bei einer Framewiederholrate $f_r = 60$ Hz und zwei Nutzern, wäre die Framedauer T_r (in Millisekunden) wie folgt zu berechnen:

$$T_r = \frac{1000}{f_r} \neq T_f$$

Die Expositionszeit eines Frames in dem o. g. Kontext beträgt hingegen etwa $3 \text{ ms} \leq T_f \leq 5 \text{ ms}$. Diese Zeit wurde experimentell im Zuge der Kalibrierung der Shutterbrille ermittelt. Im folgenden Beispiel soll erläutert werden welchen Effekt T_f auf das wahrgenommene Bild hat und, womit die auftretenden Effekte begründet sind. Gegeben sei ein FullHD-Videosignal bei dem im Takt der Bildwiederhol- frequenz $f_r = 60$ Hz abwechselnd ein weißes und ein schwarzes Bild gezeigt werden. Die Brille wird so eingestellt, dass alle weißen Bilder blockiert und alle schwarzen Frames durchgelassen werden. Wird der Monitor nun durch die Shutterbrille betrachtet, ergeben sich für unterschiedliche T_f annäherungsweise folgende Bilder:

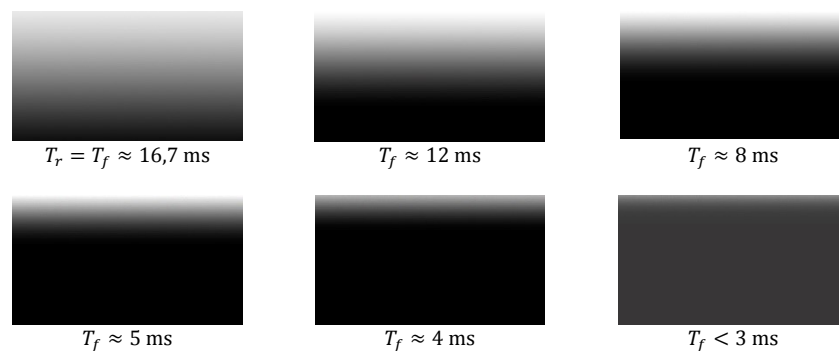


Abbildung 27: Auswirkungen der Expositionszeit ¹

Entgegen den Erwartungen kann selbst bei korrekter Synchronisation weder ein komplett schwarzes noch ein komplett weißes Bild wahrgenommen werden. Dies hängt damit zusammen, dass ein Frame nicht sofort, sondern allmählich aufgebaut wird [Vid05]. Dieser Vorgang nimmt den Großteil der Zeitperiode T_r in Anspruch, sodass das komplette Bild nur für wenige Millisekunden sichtbar ist ().

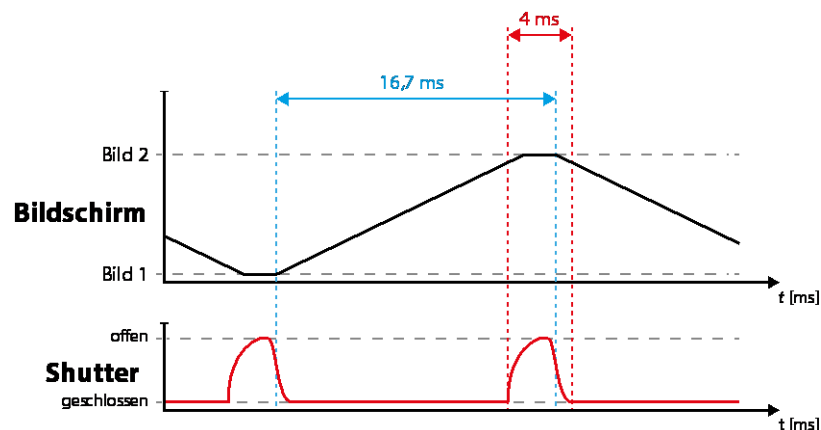


Abbildung 28: Bildaufbau vs. Expositionszeit

¹ Es handelt sich um die Zeit, in der die LC-Verschlüsse nicht mit Spannung versorgt werden. Die Trägheit des Flüssigkristallsubstrats wird hier nicht beachtet.

Es entsteht ein „Verlauf“ vom aktuellen zum nachfolgenden Frame, in diesem Fall also von Schwarz nach Weiß. Bei komplexen Bildinhalten führt dieser Effekt zu Geisterbildern (Ghosting). Mit dem sinkenden Zeitfenster T_f wird eines der Bilder (in diesem Fall Schwarz) immer deutlicher wahrgenommen. Mit $T_f < 3 \text{ ms}$ verringert sich die Belichtungszeit der Netzhaut derart, dass die Augen sich an ein konstant dunkles Bild adaptieren. Dabei kann selbst bei geschlossenen LC-Verschlüssen ein Bild auf dem LCD-TV relativ deutlich erkannt werden. Die Filterfunktion der Brille setzt damit aus. In diesem Beispiel fusionieren das schwarze und das weiße Bild zu Grau. Für eine saubere Nutzertrennung müsste das Zeitfenster, in dem ein Bild *vollständig* zu sehen ist, vergrößert werden. Folglich wäre eine Beschleunigung oder Parallelisierung beim Adressieren und Setzen einzelner Pixel notwendig. Unter diesen Umständen ist die maximale Nutzerzahl bei diesem Verfahren, selbst unter idealen Bedingungen, auf vier begrenzt [Wei04].

Eine direkte Nutzerzuweisung wird hier nicht realisiert, weil keine Schnittstelle zum Treiber der Grafikkarte besteht. Aus diesem Grund ist es derzeit nicht möglich einer bestimmten Brille eine *bestimmte* Ansicht / Perspektive / Darstellung zuzuweisen. Wenn die Nutzerzahl auf zwei beschränkt ist, lässt sich allerdings eine primitive Nutzerumschaltung realisieren. Dabei wird beim Betätigen eines Tasters, der mit dem I/O-Pin 11 verbunden ist, der VSync-Impuls-Zähler (`currentPin`) um eins inkrementiert. Im nächsten Schritt wird der Zustandsautomat (Abbildung 26) in Programmcode umgesetzt.

Neben der fehlenden Möglichkeit einer bestimmten Brille einen konkreten Nutzer zuzuweisen, bestehen mindestens zwei weitere Probleme.

Die GPU hat nur ein bestimmtes Zeitfenster für die Bereitstellung eines kompletten Frames. Wird eine Frequenz von 60 Hz verwendet, um das jeweilige Display zu betreiben, beträgt die Größe dieses Fensters mindestens 16,7 ms, kann aber je nach Bildquelle (Film, Videospiel, usw.) variieren. In dieser Zeit muss das neue Bild im Buffer der Grafikkarte abgelegt und davor ggf. noch komplett neu berechnet werden. Sollte die GPU diesen Aufgaben nicht rechtzeitig nachkommen, wird das zuletzt berechnete Bild wiederverwendet. In extremen Fällen führt dieses Verhalten dazu, dass das Bild auf dem Display „einfriert“. Für die Störungsfreiheit des Nutzertrennungsverfahrens mittels der Shutterbrille ist es jedoch absolut unabdingbar, dass die Darstellung des Frames für einen Nutzer maximal nur einen Frame, also 16,7 ms dauert. Da das Einfrieren eines Frames sich nicht auf dem VSync-Signal niederschlägt, kann das Auftreten dieses Fehlers vom Mikrocontroller nicht registriert werden. In der Praxis führt dieser Vorgang zu einer spontanen Nutzerumschaltung. Genauer gesagt sieht der Nutzer mit der Folgenummer k nach einem solchen Fehler (dauerhaft) die Ansicht des Nutzers $k + 1$.

Ein weiteres Problem stellen die LC-Verschlüsse selbst dar. Bei dem Brillenmodell, welches für diese Arbeit verwendet wurde, konnte eine ungleichmäßige Abschirmung (bei eingeschalteten Shuttern) festgestellt werden. Speziell in den Bildbereichen, die schlechter abgedeckt werden, kann es zum Ghosting-Effekt führen.

Wie jede LCD-Technologie besitzen die Shutter eine gewisse Reaktionszeit beim Ein- und Ausschalten. Diese kann mithilfe einer Fotodiode und eines Oszilloskops ermittelt werden. Der Versuchsaufbau ist in der Abbildung 29 dargestellt. Die Messung ergab eine Zeit von 3,3 ms für das Laden (Verdunkeln) eines Shutters und 2,1 ms für die Entladung. Der Kurvenverlauf für den Lade- und Entladevorgang entspricht etwa dem eines Kondensators. Eine entsprechende Skizze ist im unteren Teil der Abbildung 28 zu finden.

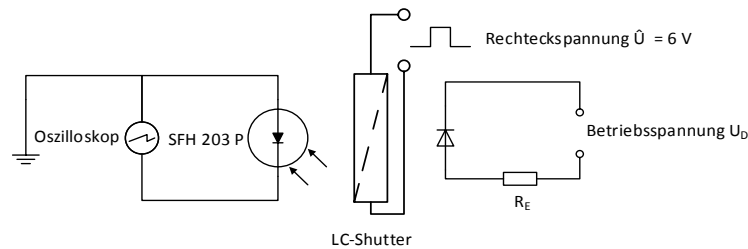


Abbildung 29: Messung der Reaktionszeit

4.3.4 Verzögerung bei der Visualisierung des Videosignals

Eine geräteabhängige Variable, die bei der Synchronisierung der Shutterbrille beachtet werden muss, ist die Verzögerung zwischen dem ausgegebenen Signal an der Videoschnittstelle (HDMI / DVI / VGA) und der tatsächlichen Darstellung des jeweiligen Frames auf dem LC-Panel. Diese Verzögerung wird unter anderem als „Display Lag“ bezeichnet. Die Ursache dafür liegt meistens in den Bildoptimierungsfunktionen des Fernsehers, welche eine bestimmte Berechnungszeit in Anspruch nehmen. Bei direkter Gegenüberstellung von einem PC-Monitor und einem LCD-TV ist der Display Lag beim TV-Gerät zum Teil mit bloßem Auge wahrnehmbar. Die Shutterbrille wird durch eine Komponente des Videosignals jedoch nahezu verzögerungslos ausgelöst. In Relation zum TV-Gerät würde es bedeuten, dass die LC-Shutter der Brille sich zu früh schließen bzw. öffnen. Der Display Lag muss beim Einstellen des Mikrocontrollers daher mitberücksichtigt werden.

4.3.5 Messung des Display Lags

Hierbei wird die Zeit zwischen dem Auftreten eines VSync-Impulses und der Darstellung des Frames, zu dem dieser Impuls gehört, gemessen. Um die Veränderung auf dem Bildschirm zu registrieren kann ein Fototransistor oder eine Fotodiode eingesetzt werden. (Fotowiderstände scheiden aufgrund einer relativ langen Reaktionszeit als Sensoren aus.) Dabei sind jedoch der VSync-Impuls und die Bildveränderung auf dem LC-Panel als einzige Indikatoren für eine zuverlässige Zeitmessung unzureichend. Das Problem soll am folgenden Beispiel verdeutlicht werden: Es werden die Signalverläufe der VSync und des optischen Sensors aufgezeichnet, während das Bild von schwarz auf weiß geschaltet wird. Die Abbildung 30 stellt das Resultat der Messung dar.

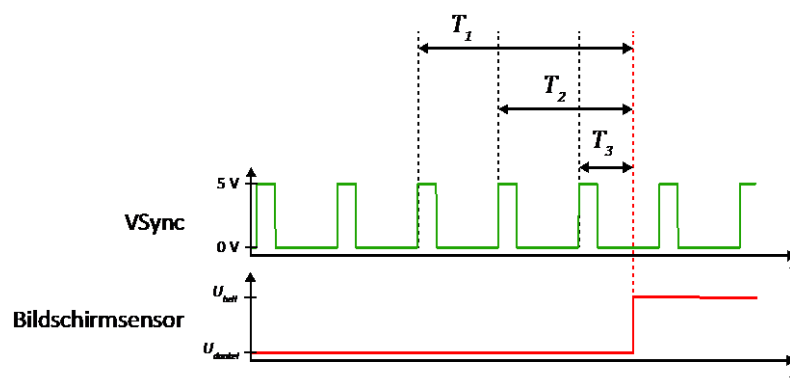


Abbildung 30: VSync und Bildwechsel

Wie aus der Abbildung 30 abgeleitet werden kann, lässt sich nicht mit Sicherheit sagen, welcher Impuls zum ersten „weißen Frame“ gehört und ob T_1 , T_2 oder gar T_3 als Display Lag interpretiert werden kann.

Dieses Problem lässt sich lösen indem zur Messung ein Farbkanal (Rot, Grün oder Blau) hinzugezogen wird. Die Messung wird nun mit dieser Ergänzung wiederholt. Die Abbildung 31 stellt das Resultat der optimierten Messung dar.

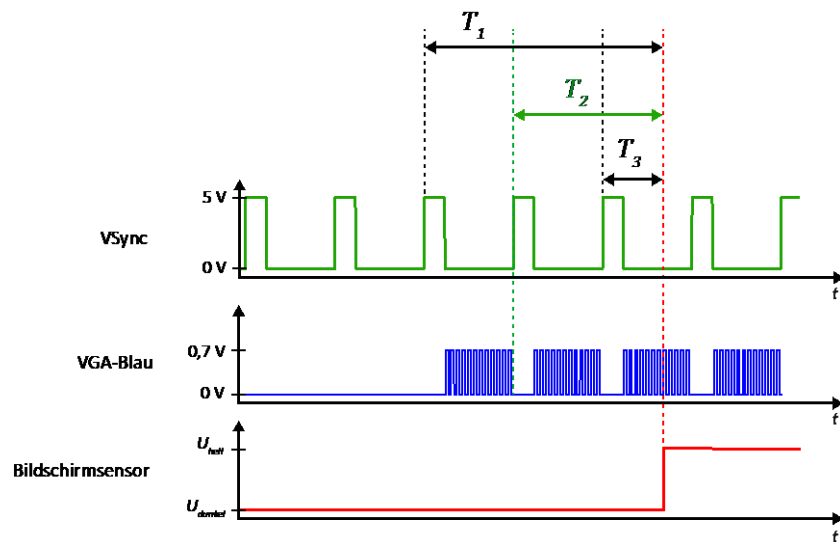


Abbildung 31: VSync mit Farbsignal

Der Anstieg des Pegels auf der „blauen Leitung“ markiert den ersten „weißen Frame“. Daher ist der erste VSync-Impuls, der auf den Pegelanstieg auf der „blauen Leitung“ folgt, für die Messung der Verzögerung relevant. Dieser Impuls markiert den Zeitpunkt, in dem die Bilddaten vollständig übertragen wurden. Das bedeutet, dass ein vollständiges Bild *frühestens* nach dem Auftreten dieses Impulses auf dem Bildschirm sichtbar werden. Somit ist T_2 der gesuchte Display Lag.

In der Praxis kann die Messung mithilfe eines Mikrocontrollers umgesetzt werden. Diese Herangehensweise bietet gegenüber der Messung mit einem Oszilloskop die Möglichkeit, mehrere Mess-Vorgänge hintereinander durchzuführen, die Dauer des Display Lags automatisch zu berechnen sowie die Ergebnisse über eine serielle Schnittstelle an den PC zu übermitteln.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine mit Arduino kompatible Platine verwendet. Als Lichtsensor wurde der NPN-Fototransistor SFH 309 eingesetzt. Um Störfaktoren, wie Sonnenlicht, zu eliminieren wurde der Transistor in einem lichtundurchlässigen Gehäuse untergebracht. In der Abbildung 33 ist die Übersicht für den Versuchsaufbau dargestellt. Die Abbildung 32 bietet eine Übersicht für die Pin-Belegung des Mikrocontrollers.

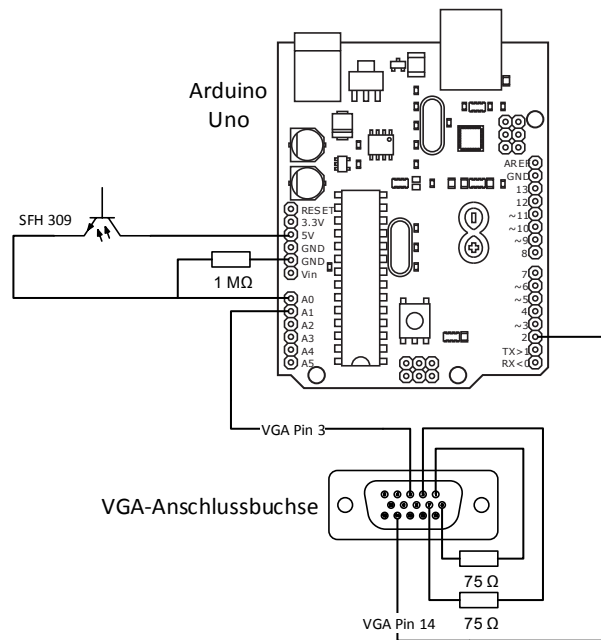


Abbildung 32: Pin-Belegung für den Arduino (basierend auf [ardBrd], [vgaF])

Da die Pegel der R- G- und B-Kanäle sowie der Pegel des Lichtsensors zu niedrig sind, um in ihrem standardgemäßen² HIGH-Zustand vom Mikrokontroller als „HIGH-Pegel“ interpretiert zu werden, werden sie mit den analogen Pins auf der Platine verbunden.

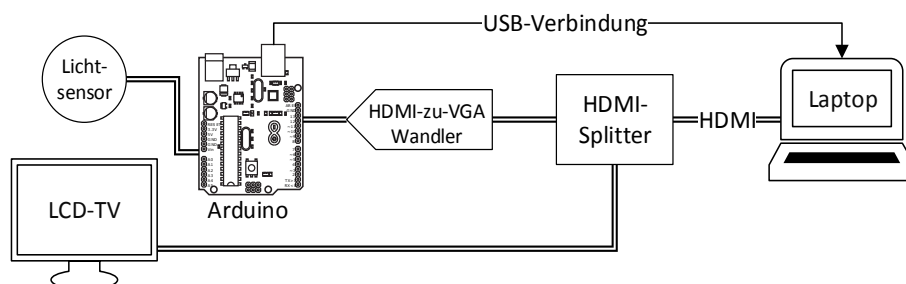


Abbildung 33: Versuchsaufbau (basierend auf [ardBrd])

Für die Ausführung des Mess-Algorithmus wurde der folgende Zustandsautomat entwickelt:

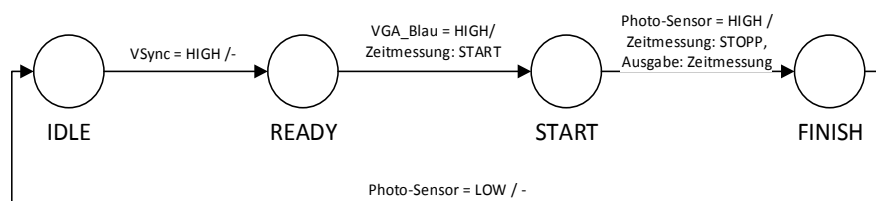


Abbildung 34: Zustandsautomat

Im IDLE-Zustand befindet sich der Automat in Bereitschaft und wartet auf einen Pegelanstieg auf der „blauen Leitung“. Sobald ein Anstieg registriert wird, schaltet der Automat in den READY-Zustand und

² HIGH-Pegel des Arduino ist mit 3 V definiert. Bei den RGB-Komponenten eines VGA-Signals liegt die maximale Spannung jedoch bei 0,7 V. [VESA97], [Ard01]

wartet auf den nächsten VSync-Impuls. Wenn dieser gemessen wird, speichert der Automat die aktuelle Zeit³ als t_s und wechselt in den START-Zustand. Der Wechsel in den FINISH-Zustand wird dann vollzogen, wenn ein Pegelanstieg auf dem Lichtsensor gemessen wird. Dabei wird wieder die aktuelle Zeit gemessen und als t_f gespeichert. Die Dauer des Display Lags wird wie folgt errechnet:

$$T_{Lag} = t_f - t_s.$$

Im nächsten Schritt wird der Zustandsautomat als Programmcode umgesetzt. Beim benutzerdefinierten Schwellenwert `screenSensorThreshold` muss beachtet werden, dass dieser je nach Bildschirmtyp und eingesetztem Fototransistor, variieren kann. Zur Bestimmung dieses Wertes (x_s) sollten die Pegel am Fototransistor beim Messen eines weißen (x_{max}) und eines dunklen bzw. schwarzen Bildes (x_{min}) herangezogen werden. Der gesuchte Schwellenwert wird dabei wie folgt errechnet:

$$x_s = \frac{x_{max} - x_{min}}{2}$$

Dabei ist eine Genauigkeit im Zehner-Bereich ausreichend. Der Testbildschirm bzw. TV-Gerät sollten bei allen Messungen auf höchstmögliche Helligkeitsstufe eingestellt sein. Zum Auslesen des gemessenen Pegels am Fototransistor ist folgender Code für die Arduino-Platine erforderlich:

```
1  void setup() {
2      Serial.begin(9600);
3  }
4  void loop() {
5      Serial.write(27);
6      Serial.print("[2J");
7      Serial.write(27);
8      Serial.print("[H");
9      int sensorValue = analogRead(A0);
10     Serial.println("LEVEL@A0:");
11     Serial.println(sensorValue);
12     delay(500);
13 }
```

Listing 1: Auslesen analoger Pegel

Mit dieser Programmierung werden die Werte des Fototransistors alle 500 ms ausgelesen. Der Quelltext in den Zeilen 6 bis 9 sorgt dafür, dass die Darstellung der Werte im Terminal immer in den ersten zwei Textzeilen getätigt wird. Die Ausgabe der Werte geschieht auch in diesem Fall über die serielle Schnittstelle des Mikrocontrollers. Zum Auslesen dieser Daten sollte für die optimale Darstellung ein vollwertiges virtuelles Terminal genutzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dafür das Programm PuTTY verwendet. Dabei sind folgende Einstellungen für die Erstellung der Sitzung (Session) zu verwenden:

| | |
|------------------|--------|
| Connection type: | Serial |
| Serial line: | COM3 |
| Speed: | 9600 |

³ Damit ist die Zeit gemeint, die seit dem letzten (Neu-)Start des Mikrocontrollers vergangen ist. Diese Zeit wird in Millisekunden angegeben.

Zur weiteren Interpretation der analogen Pegel und deren Verhältnis zur anliegenden Spannung, sei an dieser Stelle auf die Dokumentation für Arduino Platinen verwiesen [Ard02].

Die mit dieser Methode durchgeführte Messung des Display Lags für das Testgerät 55PFL7008K/12 ergab für unterschiedliche Werte, je nachdem, wo der Lichtsensor positioniert wurde. Wurde der Fototransistor am oberen Bildschirmrand angebracht, ergab sich ein Messwert von 35 ms bis 36 ms. Wurde der Fototransistor hingegen am unteren Bildschirmrand positioniert, wurde eine Verzögerungszeit zwischen 46 ms und 47 ms gemessen. Daraus lässt sich schließen, dass das Bild von oben nach unten aufgebaut wird und erst nach ca. 46 ms vollständig auf dem LC-Panel erscheint. Diese Verzögerung entspricht dem gesuchten Display Lag:

$$T_{DLag} = 46 \text{ ms}$$

Dieser Wert kann jetzt zur Definition der Variable `inputLag` in den Code für die Brillensteuerung eingesetzt werden. Das führt dazu, dass der Controller nach der Erfassung eines VSync-Impulses erst 46 ms wartet und erst dann eine Nutzerumschaltung tätigt (bzw. die Shutter öffnet oder schließt).

4.3.6 Erstellung der Testsequenz für den subjektiven Test

Im Unterschied zum Anaglyphen-Polfilter Kombination greift die momentan betrachtete Methode auch auf Zeitmultiplexing zurück. Ein einzelnes Standbild ist für den Test also nicht ausreichend. Vielmehr bedarf es einer Bildsequenz, bei der sich die Stereobildpaare nacheinander abwechseln. Zur Anfertigung einer Videodatei, die diesem Anspruch genügt, wurde auch an dieser Stelle die Anwendung Adobe After Effects CS6 verwendet. Für dieses Experiment wurde wieder das Fernsehgerät 55PFL7008K/12 verwendet.

Im ersten Schritt wird für jeden Nutzer wieder eine separate Komposition angelegt. Dabei sollte die Bildrate so eingestellt werden, dass sie mit der des LCD-TVs übereinstimmt. In diesem Fall sind 60 Hz einzustellen. Auch die Dauer der Videosequenz sollte für einen Testlauf lang genug sein (mindestens 5 Minuten). Die Auflösung muss auf 1920 x 1080 eingestellt werden (siehe Abbildung 35). Neben den beiden Bildern, die mithilfe des 3D-Editors erstellt wurden, wird eine zusätzliche Hilfsebene erstellt. Diese sollte auch die oberste Ebene in der Komposition sein. Wie bereits bei der Einstellung der Nutzertrennung beim vorherigen Versuch wird das Filter „3D-Glasses“ auf die Hilfsebene angewendet. Diesmal wird dieses Filter allerdings für die Links-Rechts Trennung benötigt. Die linke und rechte Ansicht werden mit den gerenderten Bildern verlinkt, die wieder als Ebenen zu importieren sind. Der Parameter „3D-View“ wird auf die Option „Interlaced Upper L Lower R“ eingestellt (siehe Abbildung 36). Das Ergebnis ist ein S3D-Bild, optimiert für die Darstellung auf einem Bildschirm mit alternierender Pixelzeilenpolarisation. Dieses Vorgehen wird für die Komposition des zweiten Nutzers wiederholt.

Kombination von Multiplexverfahren

Im zweiten Schritt werden die Kompositionen beider Nutzer zu einer Gesamtkomposition zusammengefasst. Nun ist es erforderlich, dass die Deckkraft der oberen Komposition frameweise zwischen 0% und 100% Prozent alterniert. Neben der Animation über Key-Frames, bietet Adobe After Effects die Möglichkeit alle animierbaren Parameter über Code-Ausdrücke (eng. Expressions) einzustellen (Abbildung 37). Es bietet sich daher an, die Deckkraft von der Folgenummer des aktuellen Frames abhängig zu machen. Der fertige Code im Listing 2 dargestellt.

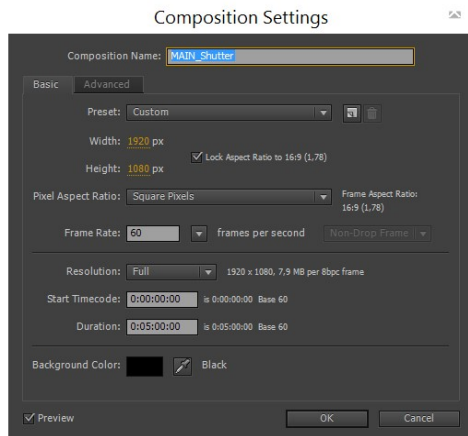


Abbildung 35: Kompositionseinstellungen

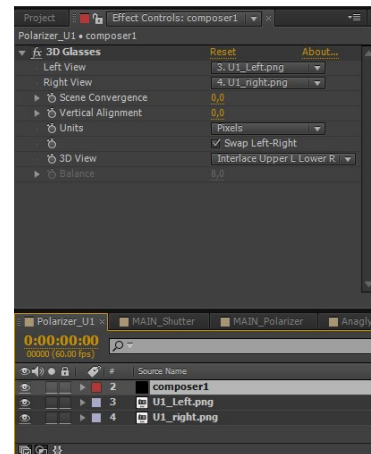


Abbildung 36: 3D-Glasses Einstellungen

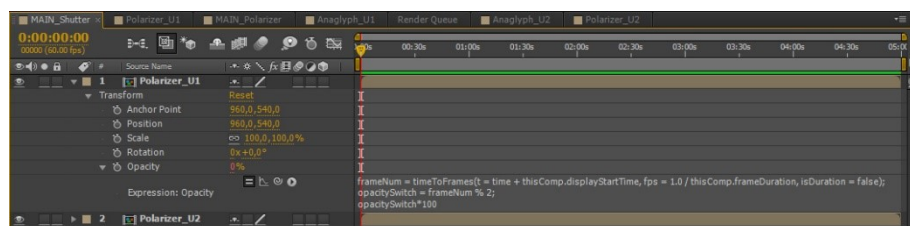


Abbildung 37: Deckkraftanimation (Screenshot)

```
1 frameNum = timeToFrames(t = time + thisComp.displayStartTime,  
2 fps = 1.0 / thisComp.frameDuration, isDuration = false);  
3 opacitySwitch = frameNum % 2;  
4 opacitySwisch*100
```

Listing 2: Deckkraftparameter

Nach der Ermittlung der Framenummer aus der aktuellen Zeit (Zeile 1 und 2), wird mithilfe der Modulo-Rechnung (Zeile 3) ermittelt, ob das jeweilige Frame eine gerade oder ungerade Folgenummer hat. Anschließend wird das Ergebnis mit 100 multipliziert. Damit haben alle ungeraden Frames eine Deckkraft von 100% und alle geraden 0% (transparent). (In Adobe After Effects entspricht der Wert von 100% Prozent der Zahl „100“ und nicht „1,0“). Wird nun die obere Ebene komplett transparent, ist die Ebene unter ihr zu sehen. Damit wechseln sich die Nutzeransichten Frameweise ab. Die Sequenz wird unter Nutzung der H.264-Komprimierung (mittlere Bitrate = 25 Mbps) als eine MP4-Datei gerendert. Die Dauer der Testsequenz beträgt 5 Minuten.

4.3.7 Subjektiver Test - Durchführung

Wie im vorherigen Kapitel soll auch dieses Verfahren an Probanden (insgesamt sieben Personen) getestet werden. Da ein deutlich wahrnehmbares Flimmern unter Umständen zu Augen-,

Kombination von Multiplexverfahren

Kopfschmerzen und Übelkeit führen kann, ist die Dauer des Tests für jeden Probanden auf ein Minimum zu beschränken. Die übrigen Rahmenbedingungen verbleiben wie beim vorherigen Test. Der Versuch wird wieder bei jedem Probanden einzeln durchgeführt. Zunächst werden die einzelnen Komponenten, wie auf der folgenden Abbildung dargestellt, miteinander verbunden:

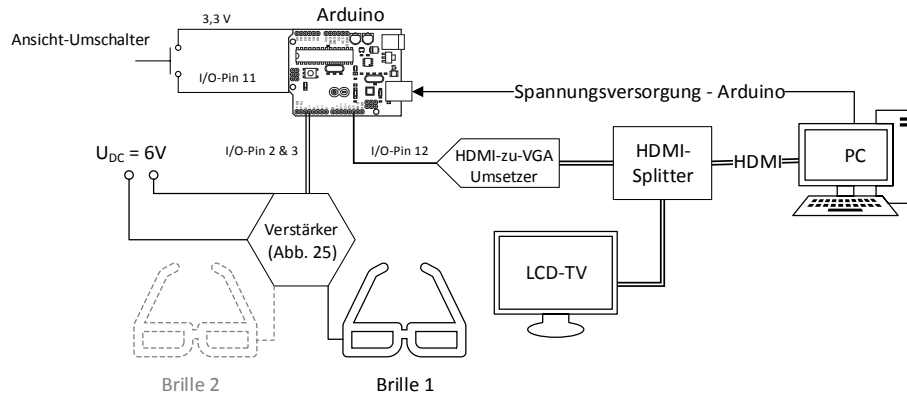


Abbildung 38: Aufbau - Shutter-Polfilter Test (Übersicht)

Ein genaueres Schaltbild für den Mikrocontroller ist in der Abbildung 39 dargestellt.

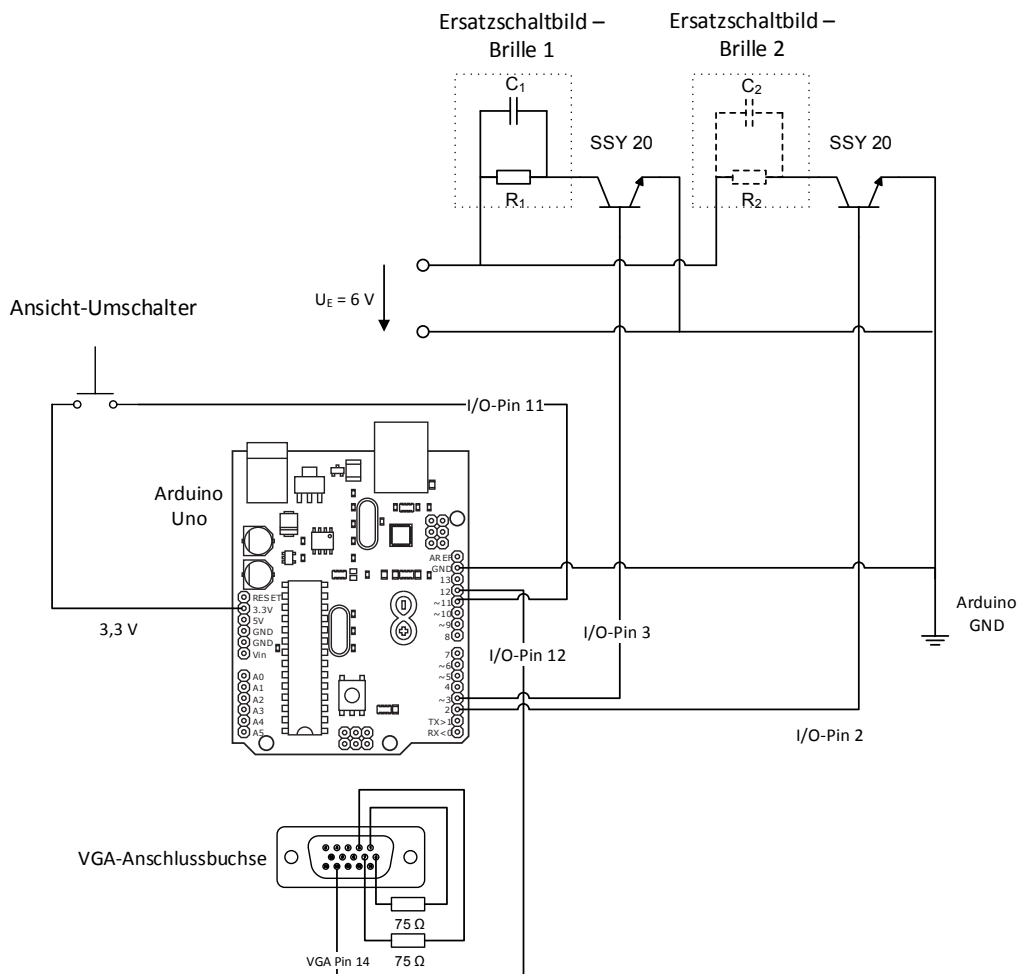


Abbildung 39: Aufbau - Shutter-Polfilter Test (Arduino)

Wie bereits bei der Ermittlung des Display Lags, wird auch hier das Videosignal von einem Rechner über einen Verteiler an das Fernsehgerät (55PFL7008K/12) und den Arduino weitergeleitet. Ein HDMI-zu-VGA Umsetzer extrahiert dabei das VSync-Signal zur Synchronisation der Shutterbrille mit dem Bildschirm. Die Verstärkerschaltung aus der Abbildung 25 liefert die nötige Spannung zum Betreiben der Flüssigkristallverschlüsse. Um das Einfrieren einzelner Frames beim Abspielen der Testsequenz zu vermeiden, wurde anstelle eines Laptops ein vollwertiger Rechner mit einer Grafikkarte vom Typ NVIDIA GeForce GTX 580 verwendet. Das Testvideo wird auf dem PC mit dem Media Player Classic (MPC-HC) abgespielt, welcher eine Beschleunigung durch die Grafikkarte unterstützt. Da die einzelnen Frames für die Darstellung auf dem Testgerät optimiert sind (alternierende Zeilen), kann zur Betrachtung eines Referenzbildes die Videosequenz einfach pausiert werden. Im Pausenmodus ist die RealD-Brille zu verwenden. Das Testbild bzw. die Testsequenz wird durch die Shutterbrille betrachtet, die mit den Polfiltern erweitert wurde. Logischerweise muss das Video dabei in den Wiedergabemodus umgeschaltet werden.

4.3.8 Subjektiver Test – Auswertung

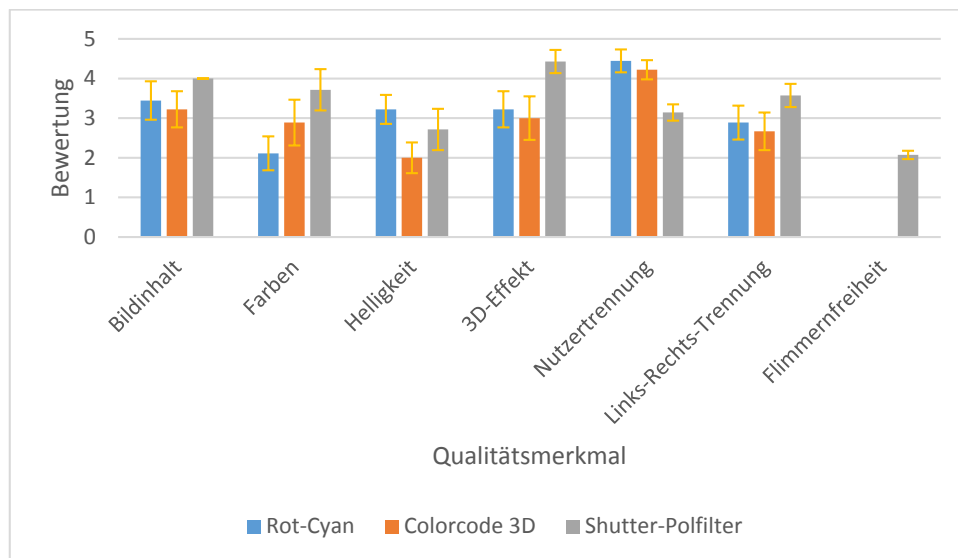


Abbildung 40: Auswertung des Tests (alle Systeme)
 (Die Bewertung „5“ entspricht der Qualität des Referenzbildes)

Hinsichtlich der allgemeinen Bild- und Farbwiedergabe sowie der Qualität des 3D-Effektes und der, damit verbundenen, Links-Rechts Trennung, liefert die Kombination aus Shutterbrille und Polfilter bessere Ergebnisse als das Anaglyphen-Polfilter System. Im Bereich der Bildhelligkeit ist die Rot-Cyan Brille minimal besser.

Die Probleme, die im Abschnitt 4.3.3 beschrieben wurden, schlagen sich sehr deutlich auf der Qualität der Nutzertrennung nieder. Wegen der geringen Zeitspanne, in der ein Frame des Nutzers n auf dem LC-Panel vollständig zu sehen ist, aber auch wegen des „fließenden“ Bildwechsels, werden Teile des Bildes vom Nutzer $n \pm 1$ sichtbar. Ein viel größerer Minus-Punkt ist allerdings das deutlich sichtbare Flimmern. Dieses wurde von allen Probanden, wie erwartet, als „sehr störend“ empfunden. Wenn überhaupt, ist bei der getesteten Gesamtbildrate von 60 Hz (zwei Nutzer á 30 Hz) lediglich eine Einsatzdauer von wenigen Minuten gegeben.

Leider hat während des Versuchs eine Bildoptimierungsfunktion des LCD-TVs sowohl die Referenzbilder als das Testbild qualitativ etwas beeinträchtigt. Genauer gesagt, wurde die Funktionsweise der Polfilter durch die nachträgliche Erhöhung der Bildschärfe leicht gestört. Leider

wurde erst nach dem Abschluss der Probandentests festgestellt, dass es sich um eine Einstellung des Fernsehschalters gehandelt hat. Aus Zeitgründen konnten die Versuche nicht mehr wiederholt werden. Da jedoch alle Bewertungen in Relation zu den o. g. Referenzbildern getroffen wurden, ist davon auszugehen, dass die Testergebnisse nicht verfälscht wurden.

Sowohl dieser als auch der vorherige Versuch wurden mit einer kleinen Zahl von Probanden durchgeführt. Sie dienen daher lediglich als Orientierung und ersetzen keine groß angelegte Studie.

4.3.9 Objektiver Test

Wie im Versuch mit der Anaglyphen-Polfilter Kombination, werden auch hier Messungen mit dem SpectraScan® Spectroradiometer PR-670 durchgeführt. Weiterhin wird ein Experiment aufgebaut, der über die Qualität der Synchronisation der Shutterbrille mit dem Bildschirm Aufschlüsse geben soll.

Zunächst wird die Auswirkung der Shutter-Polfilter Kombination auf die Bildhelligkeit gemessen. Die Referenzwerte werden aus dem vorherigen Versuch hinzugezogen (siehe Abbildungen 18 bis 20). Es wird erwartet, dass die Filter die Bildhelligkeit beeinträchtigen (selbst bei geöffneten Verschlüssen). Außerdem wird eine geringe Beeinträchtigung der Farbwiedergabe erwartet. Die Messergebnisse sind in den Abbildungen 41, 42 und 43 zu finden.

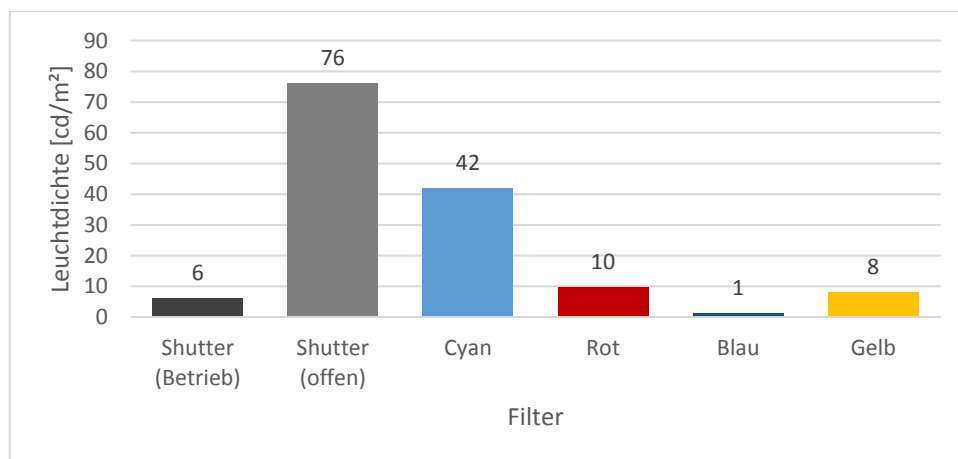


Abbildung 41: Leuchtdichte – Filter

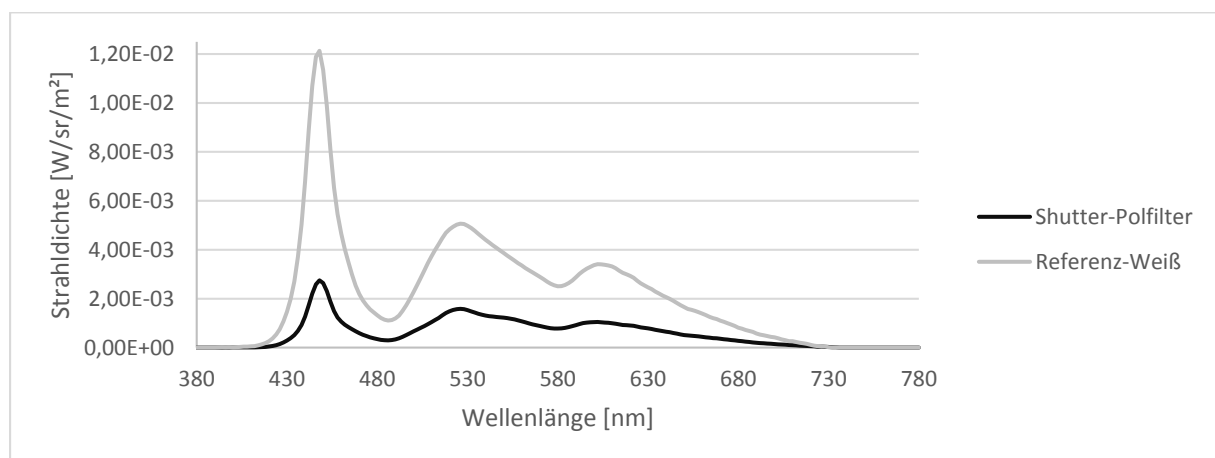


Abbildung 42: Shutter-Polfilter (geöffnet)

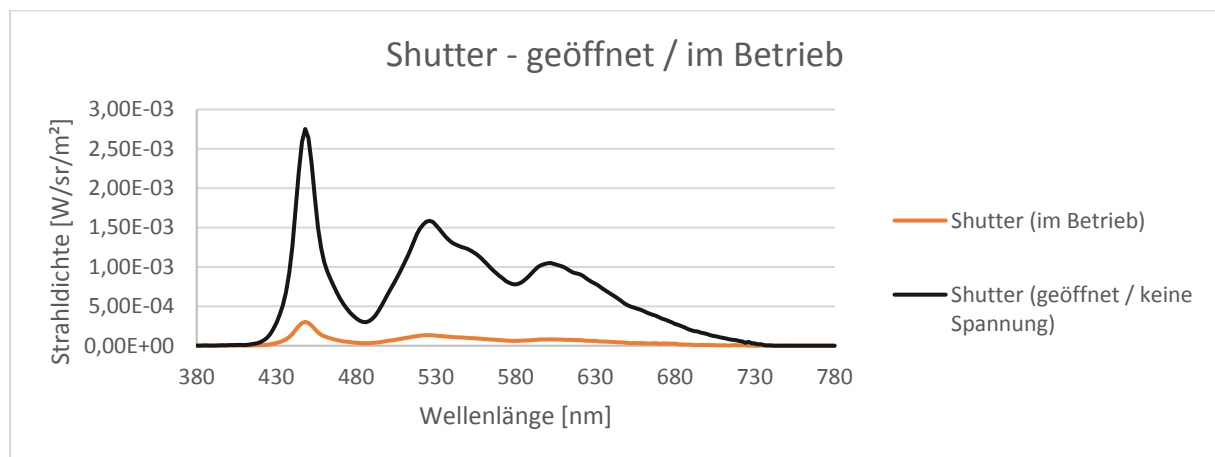


Abbildung 43: Shutter-Polfilter (im Betrieb⁴)

Während sich die Brille im Betriebsmodus befindet, d. h. für 4 ms geöffnet wird und für die übrige Zeit geschlossen bleibt (zwei Nutzer), sinkt die verbleibende Leuchtdichte auf unter 0,1% ihres Ursprungswertes von 250 cd/m². Der blaue Lichtanteil wird um etwa 4,5% stärker gedämpft als das restliche Lichtspektrum, was ggf. zu einer leichten Farbverfälschung führen kann.

Darüber hinaus konnte ermittelt werden, dass die Drehung der Polfilter, deren Notwendigkeit im Abschnitt 4.3.1 erläutert wurde, sich auf den Filtereigenschaften niederschlägt. Gegeben sei ein Full HD-Bild, bei dem alle geraden Pixelzeilen weiß und alle ungeraden Zeilen schwarz gefärbt sind. Das zirkulare Polarisationsfilter wird so gewählt, dass das Licht aller geraden Zeilen blockiert wird. Das Bild was man danach durch das Filter sieht, sollte idealerweise schwarz sein, was bei normalen RealD-Brillen weitestgehend auch der Fall ist. Wird die Brille bzw. das Filter um $\pm 90^\circ$ gedreht, wechselt die Farbe von schwarz nach dunkelviolett. Die Erklärung für dieses Verhalten liegt in der Beschaffenheit Verzögerungsplatte und der Drehung der linearen Polfilter in Relation zueinander. Wie im Abschnitt 2.1.3 bereits erklärt wurde, verzögert die $\lambda/4$ -Platte eine der beiden Teilwellen des eintretenden Lichts um einen Viertel ihrer Wellenlänge. Waren die Teilwellen zuvor phasen- und amplitudengleich, entsteht danach eine sich, je nach Konfiguration des zirkularen Polfilters, rechts- bzw. linksdrehende Lichtwelle. Diese Bedingung erfüllt die Verzögerungsplatte jedoch nur für eine Wellenlänge λ gleichzeitig. In der Regel richtet man die Wahl dieser Wellenlänge danach, für welche Farbe das Auge am empfindlichsten ist mit $\lambda \approx 555$ nm (grün). Anhand der Spektralanalyse (Abbildung 44) wurde ermittelt, dass beim getesteten LCD-TV die $\lambda/4$ -Platte auf eine Wellenlänge zwischen 500 nm und 525 nm ausgelegt ist: Unabhängig von der Drehung des Filters verändert sich die Strahlendichte in diesem Bereich kaum bis gar nicht.

⁴ Die Brille wird nach dem Algorithmus aus dem Abschnitt 244.3.3 (Abbildung 26) mit Spannung versorgt.

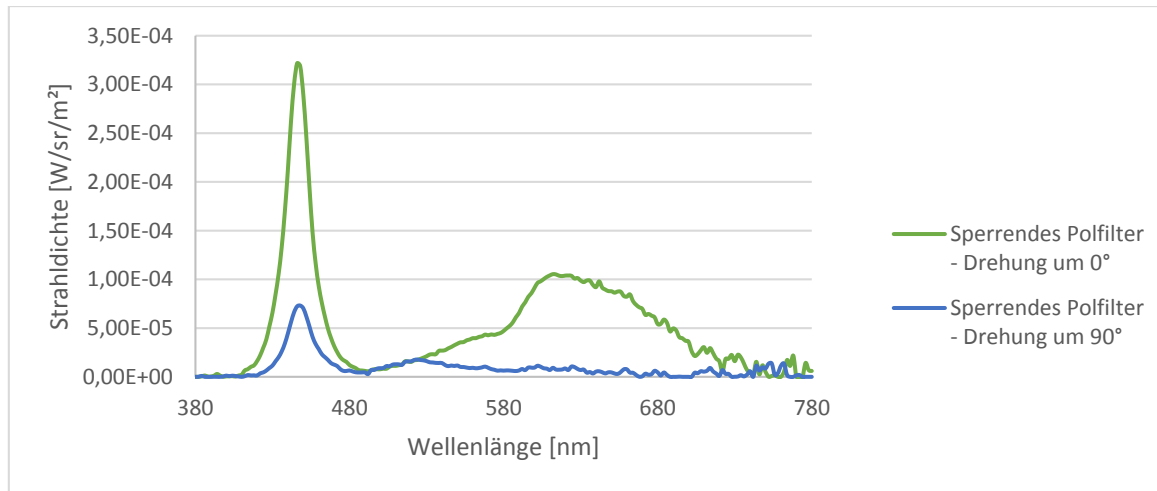


Abbildung 44: Polfilterdrehung

Längere und kürzere Lichtwellen werden dagegen in einem geringen Umfang durchgelassen und ergeben zusammen ein dunkles Violett. Bei handelsüblichen Geräten besteht die Lösung dieses Problems darin, die linearen Filterkomponenten so zueinander auszurichten, dass sie hinsichtlich ihrer Durchlassrichtung orthogonal liegen. Eine Lichtwelle, die das erste lineare Filter (Bildschirmseite) durchquert wird dementsprechend vom zweiten Filter (Brille / Nutzerseite) im Idealfall vollständig blockiert. Wird die Brille bzw. das Filter um $\pm 90^\circ$ gedreht, sind die linearen Filter bezüglich ihrer Durchlassrichtung parallel zueinander und sowohl der blaue als auch der rote Störlichtanteil können beide Filter passieren [Zaw03]. Dieser Umstand könnte eine Erklärung dafür sein, dass die Links-Rechts-Filterung gegenüber dem Referenzbild beim subjektiven Test schlechter bewertet wurde, obwohl für diesen Zweck ein Verfahren genutzt wurde, welches für den verwendeten LCD-TV optimiert war.

5 Fazit und Ausblick

Nach erfolgter Auswertung der durchgeführten Experimente kann im Allgemeinen ein neutrales Fazit gezogen werden: Multiuser-S3D lässt sich in einfacher Form bereits jetzt auf handelsüblichen LCD-TVs realisieren, jedoch nur mit, teilweise massiven, Einschränkungen im Bereich der Bildqualität. Insbesondere das Anaglyphen-Polfilter Verfahren lässt sich mit einfachsten Mitteln verwirklichen, sofern auf farbgetreue Wiedergabe verzichtet werden kann. Für die vollwertige Nutzung der Polfilter-Shutter Kombination wäre ein TV-Gerät notwendig, welches die Eigenschaften und Technologien eines passiven und eines aktiven S3D-Systems in sich vereint. Theoretische wäre das Betreiben eines zeilenweise alterniert-polarisierten LC-Panels mit einem 120 Hz (oder höher) fähigen TV-Mainboard möglich. Diese kommen schon heute bei Shutter-basierten 3D-Fernsehgeräten zum Einsatz. Eine solche Erweiterung wäre für die Bereitstellung einer höherwertigen Multiuserfunktionalität ausreichend. Ohne weitere Modifikationen wäre die maximale Nutzeranzahl bei diesem Ansatz ebenfalls auf zwei beschränkt. Durch die höhere Bildrate wäre das Flimmern der Shutter und des Bildes eliminiert. Mit steigender Nutzeranzahl sinkt allerdings die Belichtungszeit der Netzhaut jedes einzelnen Nutzers. Dadurch wird das Bild immer dunkler [Wei04]. Ohne weitere Veränderungen eignen sich, die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Systeme höchstens für weiterführende Forschungszecke.

Unabhängig von der Herangehensweise stößt jedes Verfahren zur Realisierung der S3D-Multiuserfähigkeit ab einer gewissen Nutzeranzahl unweigerlich an seine Grenzen. Das hängt primär damit zusammen, dass die Menge der Daten, die durch die Hardware erzeugt, übertragen und verarbeitet werden müsste, sich um die Anzahl der Nutzer vervielfacht.

Angeichts der aktuellen Entwicklung im Bereich der Bildschirme und deren Auflösung [Pho15], bietet sich die Nutzung von Mikrolinsenrastern an. Insbesondere in Bereichen, in denen die Bildinhalte zum Großteil künstlich erzeugt werden (VR), wäre die Erzeugung von Lichtfeldern für eine entsprechende Darstellung relativ einfach [Vid02]. Im Vergleich zu den übrigen Verfahren haben die Mikrolinsenraster die entscheidenden Vorteile wie die hohe Lichtausbeute und die wegfallende Notwendigkeit einer Filterbrille. Je nach Einsatzzweck wäre auch die Implementierung eines „Tensor Displays“ denkbar [MIT10], [MIT11].

6 Verwendete Software

Adobe After Effects CS6

Adobe Photoshop CS6

Autodesk 3ds max 2014

PuTTY 0.63

Arduino IDE 1.0

Externe Bibliothek: QueueList © 2010 Efstathios Chatzikyriakidis
(*GNU General Public License*)

Notepad++ v6.5

Photo Research SpectraWin™ 2

Fullscreen Photo Viewer 2.2

MPC-HC 1.7.10 64-bit

7 Quellenverzeichnis

7.1 Literatur / Wissenschaftliche Publikationen

- [MIT11] **Gordon Wetzstein, Douglas Lanman, Wolfgang Heidrich, Ramesh Raskar** (2011).
Layered 3D: Tomographic Image Synthesis for Attenuation-based Light Field and High Dynamic Range Displays
(<http://alumni.media.mit.edu/~dlanman/research/Layered3D/>)
- [MIT10] **Douglas Lanman, Matthew Hirsch, Yunhee Kim, Ramesh Raskar** (2011).
Content-Adaptive Parallax Barriers: Optimizing Dual-Layer 3D Displays using Low-Rank Light Field Factorization
(<http://alumni.media.mit.edu/~mhirsch/hr3d/>)
(2010)
- [VESA97] VESA Plug and Play Display Standard Version 1, Revision 0, 11.06.1997
- [Wei04] **Bernd Froehlich, Joerg Hoffmann, Karsten Klueger, Jan Hochstrate** (2004).
"Implementing Multi-Viewer Time-Sequential Stereo Displays Based on Shuttered LCD Projectors"
- [Woo11] **Andrew Woods and Jesse Helliwell, Curtin University** (2011).
"A Survey of 3D Sync IR Protocols"

7.2 Internet

Letzter Aufruf aller Internetquellen: 19. – 20.12.2015

- [3djr] 3D pictures with true colors
<http://www.3djournal.com/001/artic38.php>
- [3dv10] *Modifying the 3D Vision Glasses to Show 2D Left or Right Frame Only*
(<http://3dvision-blog.com/3139-modifying-the-3d-vision-glasses-to-show-2d-left-or-right-frame-only/>)
- [Ana] *Anaglyph 3D*
(https://en.wikipedia.org/wiki/Anaglyph_3D)
- [Ard01] Arduino Reference - Constants
<https://www.arduino.cc/en/Reference/Constants>
- [Ard02] Arduino Reference - AnalogRead
<https://www.arduino.cc/en/Reference/AnalogRead>
- [Bar04] Barco: Virtual Surgery Table.
<http://www.barco.com/de/Produkte-und-L%C3%B6sungen/Compact-Multi-User-Projection-Table.aspx/>

Quellenverzeichnis

- [Inf] <http://www.infitec.net/index.php/de/>
- [Wim15] **Peter Wimmer** (2005 - 2015) „Vergleich von Anaglyphenverfahren“
http://www.3dtv.at/knowhow/AnaglyphComparison_de.aspx
- [Rea0x] *Grundsätze des 3D Stereosehens*
https://www.reallusion.com/de/iclone/help/iclone5/PRO/09_3D_Vision/The_Concepts_of_Stereo_Vision.htm
- [Tsi12] *VSync-driven shutter glasses*
(<https://codelab.wordpress.com/2012/03/02/vsync-driven-shutter-glasses/>) Letzter
- [Tos10] Integral Imaging 3D Display without Dedicated Glasses
https://www.toshiba.co.jp/rdc/rd/fields/11_e02_e.htm
- [Pho15] Ultra crisp: Top 5 smartphones with highest PPI ratios (Summer 2015 edition)
http://www.phonearena.com/news/Ultra-crisp-Top-5-smartphones-with-highest-PPI-ratios-Summer-2015-edition_id69892
- [Vau10] *Primer: The Principles Of 3D Video And Blu-ray 3D*
(<http://www.tomshardware.com/reviews/blu-ray-3d-3d-video-3d-tv,2632.html>)
- [Vid02] Douglas Lanman (NVidia) - Light Field Displays at AWE2014
<https://www.youtube.com/watch?v=8hLzESOf8SE>
- [Vid03] *'True 3D' Display Using Laser Plasma Technology #DigInfo*
(<https://www.youtube.com/watch?v=EndNwMBEiVU>)
- [Vid04] Glasses-Free 3D Display Using Integral Imaging - Toshiba : DigInfo
<https://www.youtube.com/watch?v=8uUWydvF18I>
- [Vid05] Asus VG278H High Speed LightBoost Video
<https://www.youtube.com/watch?v=hD5gjAs1A2s>
- [Vid06] Light Field Rendering - Siggraph '96 video
<https://www.youtube.com/watch?v=dMcZpeGOBPI>
- [Zaw03] **Prof. Dr. Dietrich Zawischa** (genaues Publikationsdatum unbekannt).
„Brillen für 3d-Filme“
<https://www.itp.uni-hannover.de/~zawischa/ITP/zirkul.html>

7.3 Bildmaterial

- [3dMod] Victorian House
(3D-Modell vom Nutzer „Paulwall“, bürgerlicher Name nicht bekannt)
<https://3dwarehouse.sketchup.com/model.html?id=eb3ad3cc87bcdeb8df7c2291dc6e0f4f>
- [subCol] Subtraktive Farbmischung
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/52/Synthese-.svg>
(CC BY-SA 2.5)
- [ardBrd] Arduino Platine, schematische Darstellung
http://physicalcomputinglibrary.digitalemedien-bremen.de/media/056_connection.svg
(CC BY-NC 2.5)
- [vgaF] VGA-Anschluss (weiblich)
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/30/DE15_Connector_Pinout.svg

Selbstständigkeitserklärung

Der Verfasser erklärt, dass er die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt hat. Die aus fremden Quellen (einschließlich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind ausnahmslos als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.

Cottbus, 31.12.2015

Unterschrift des Verfassers